

レーダーで見る降水系に魅せられて —豪雨の理解・予測・社会実装の四十年—

Captivated by Precipitation Systems through Radar: Four Decades of Understanding, Prediction, and Implementation

中北英一^{(1), (2)}

Eiichi Nakakita^{(1), (2)}

(1) 京都大学 総長特別補佐 名誉教授

(2) (一般財団法人) 日本気象協会 顧問

(1) Special Assistant to the President, Professor Emeritus, Kyoto University

(2) Senior Executive Adviser, Japan Weather Association

Synopsis

Starting with three-dimensional radar analysis in the 1980s, synchronized observations with polarimetric radar, multi-frequency radar, and particle sondes have been conducted to observe and gain insight into the internal processes of heavy rainfall phenomena. With the establishment of the X-band polarimetric radar network (XRAIN) in 2010, three-dimensional observations with a resolution of 250 m and 1 minute became possible, dramatically improving the monitoring of short-term heavy rainfall. In the wake of the Toga River disaster in 2008, a risk prediction method based on the detection of "the eggs of sudden heavy rainfall (radar first echo)" and vertical vorticity was developed, and this method was put into operation by the Kinki Regional Development Bureau in 2015.

キーワード: 気象レーダー, 偏波レーダー, XRAIN, 三次元立体観測, グリラ豪雨, 鉛直渦度, 早期探知

Keywords: weather radar, polarimetric radar, XRAIN, 3D observation, severe storm, vertical vorticity, early detection, flash flood

1. はじめに

研究内容をすべて含めることはできないので「レーダーで見る降水系に魅せられて」というタイトルで気象レーダーを用いた研究を中心にまとめる。

学生時代は工学部土木工学科の高棹琢磨先生の研究室に所属し、その後池淵周一先生の防災研究所水資源研究センターの助手、助教授をつとめた。その後、建築学、土木工学、衛生工学、資源工学の4つの一部で設立された独立専攻の環境地球工学専攻の助教授に異動し、4年半後には防災研究所に戻り20年半

教授をつとめた。

海外との関係では、アメリカ・アイオワ大学に在外研究員(訪問准教授)として滞在し、また、国立シンガポール大学では客員研究教授をつとめた。その他特に、韓国では世宗大学をはじめとしたいくつかの大学や土木研究所, K-WATER, 台湾では台湾大学, 中央大学, 成功大学をはじめとする大学や国家防災救助科学技術センター(NCDR)の皆さんと共同する機会を得た。

2. これまでのレーダーを用いた降水研究の推移

基本的にはレーダーによる降水系の研究、災害防止・軽減のための研究を40年強の期間ずっと継続してきた。以下では、気象レーダーのことを単にレーダーと記す。

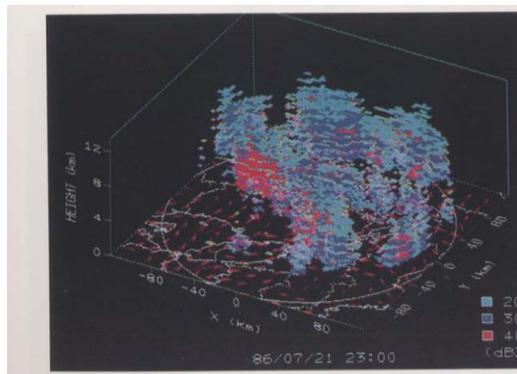


Fig. 1 Three-dimensional structure and intensity distribution of precipitation areas (see Nakakita et al., 1987).

卒業論文・修士論文の時に椎葉ら(1984)のレーダーを使った移流モデルによる降雨予測モデルをベースに、洪水予測まで一体化した豪雨・洪水予測研究をスタートさせた。当時は平面二次元、すなわち平面的なレーダー情報を使うというのが主流だった。しかし、いくらレーダーにより時々刻々ときめ細かな降水情報が得られても平面情報だけでは精度良くは豪雨の予測ができないことが全国的にも明らかとなってきた。

このように、洪水の予測の前に豪雨予測がしっかりできないというのを愕然と認識した。その後、博士課程の半年間、そして池淵周一教授の助手に採用された初期から気象学の独学に集中させていただき、そしてメソ気象学にどっぷりつかってゆくことになる。その間、気象学を土台としたレーダー立体観測情報の有効利用研究をスタートさせ、それが後継者も含め今も続いている。たとえば、まず中北ら(1987)はFig. 1のようにレーダー観測豪雨の立体構造を表現・解析できるようにし、中北ら(1988)のように独自にメソ大気モデルを構築して、それらをベースに中北ら(1992)のようにレーダー立体情報から大気の初期情報をリトリーブできる手法を開発し、最終的には中北ら(1990)やNakakita et al. (1996)のように立体レーダー情報を用いた降雨の短時間予測手法を開発している。加えて、建設省近畿建設局(現国土交通省近畿地方整備局)淀川ダム統合管理事務所ではそれをベースにダム管理を目的として実用化している(Nakakita et al., 1993)。

その後、気象レーダー自身の技術が進歩する。単に降水粒子に反射して返ってくる電波の強さだけではなく、最新偏波レーダーは、風速は当然のこと、雨粒の形や大きさまで測れる最新の機能を有する。それを有効利用していく目的で、数年の準備期間を経て沖縄での粒子ゾンデと最新偏波レーダーとの世界で初めての同期観測を仲間の研究者と2007年にスタートさせ、その共同は今も続いている。これからも4年間大台ヶ原や屋久島において地形性降雨強化の観測を進めていく予定となっている。

気候変動研究の方も、多くの方々との活動のおかげにより、花咲いた形で15年間代表をつとめ、現在では森信人教授や多くの皆様に引き継がれ続けている。

3. 研究に対する思いと多くの方々との協働

プロジェクトとしては、90年代はじめに山梨大学砂田憲吾助教授(現名誉教授)が立ち上げられた琵琶湖プロジェクトの第2期目の代表を1995年に引き継いだ(中北・砂田, 1997)。1995年には衛星観測、航空機観測、飛行船観測、地上観測による同期観測という大きな1週間から10日の集中観測を延べ約百人の皆さん共同実施することができた。この共同かつ現地観測が大きな経験となり、その後のさらなるいくつかのプロジェクトを多くの皆さんと一緒にやってこれるようになった。

文部科学省の気候変動予測プロジェクトでは、全国の約100名の方々と一緒にハザード予測・適応課題の代表をつとめ、領域気候予測課題を担当の気象庁気象研究所とも密に連携した(中北(2022))。後述する沖縄集中降雨観測をはじめとするCOBRAプロジェクトは、全国の大学の土木工学、気象学、電波工学を専門とするの皆さんと横断的な研究プロジェクトである。ともに、現在も継続している。

幸いなことに災害調査にも多くの機会を得た。工学研究科へ異動の2000年前後あたりから10年ぐらいの間に集中的に、国内外の災害現場へ調査として参加した。

特に、メコンデルタへの訪問は研究観に大きな影響をもたらした。1999年に平時のメコンデルタを訪問する機会を得、翌年には大洪水時、すなわちメコンデルタが洪水で本当に大海原になっている時にも訪問する機会を得て、1999年平時の子供たちの笑顔が2000年の大洪水でどうなっているか?との問いを持って再訪したら、ちゃんと1か月単位で避難してて、楽しく遊んでいるところを見ることになった。災害とこういう子供たちの笑顔というのがすごく頭のうちのテーマで、自身が社会学者ではないので研究に

は発展させることはできなかったものの、その思い、子供達の笑顔をバックの大事な心の土台にしながら、2008年の都賀川のゲリラ豪雨災害では子供たちは被害に会い犠牲になったことから、今もずっとゲリラ豪雨の研究をしつこく継続している。

4. 社会貢献について

後述する沖縄の最新型偏波レーダーCOBRAを使わせていただいて降雨量推定精度向上の研究を進めることによって（中北ら，(2008)），国土交通省九州地方整備局の大型レーダー（Cバンドレーダー）である釈迦岳レーダ雨量計が，2009年に全国で初めて最新型編波レーダーに更新することに貢献した．加えて，2010年から数年で構築された新しい小型レーダー（Xバンドレーダー）全国39機による全国ネットワーク構築にも貢献することができた（中北(2010)）．

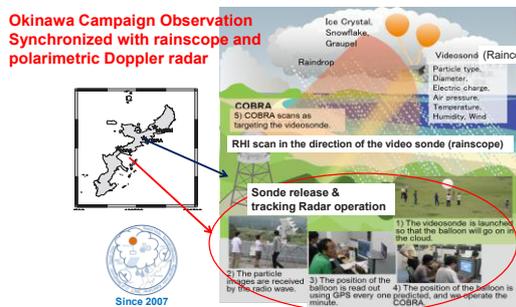


Fig. 2 Okinawa Campaign Observation Synchronized with rainscope and polarimetric Doppler radar (see Nakakita, 2013) .

気候変動関係では、中北（2022）に示すように、4年前に全国109一級河川の河川整備基本方針、すなわち治水の目標を地球平均気温が産業革命以来2℃上昇する世界に対応できるように変更することが決定されて、現在30以上の一級河川で既に更新されている．そこに至るまで、文部科学省気候変動予測プログラム参加の研究者と国土交通省とが色んな議論を重ね、現在も貢献を続けている．

5. 偏波レーダーと粒子ゾンデの同期観測

5.1 同期観測の概要

Fig. 2に示すような、2007年から沖縄において、情報通信研究機構がCバンドレーダーとしては世界4機目として導入した最新型偏波レーダーCOBRAと、当時はビデオゾンデと呼んでいた粒子ゾンデとの同期観測研究について述べる（Nakakita, (2013)）．現在、ビデオゾンデ、粒子ゾンデはCloudscope, Rainscopeとよばれている．

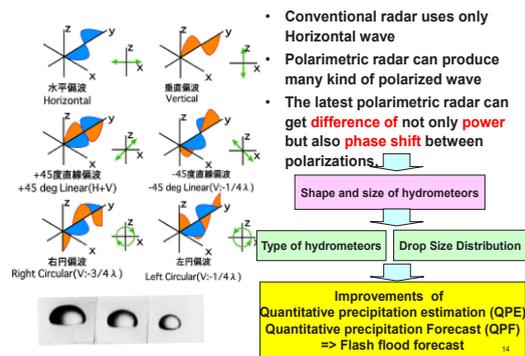


Fig. 3 Explanations of what is the polarimetric radar

偏波レーダーで上空の雨粒の形や大きさ、さらには0度層より上空にどのような形、すなわちどのようなタイプの降水粒子が存在するか、すなわち凍った水があるのかあられがあるのか霰があるのか、雪片があるのかをレーダーで推測する研究のスタートでもあった．

この一連の研究の初期に偏波レーダーだけで研究推進しようとした中、COBRAを訪問中に田中賢治助教授（現教授）が、実際レーダービームが走っている上空のその場所で、実際に何が浮いているかを直接見ることはできないのか？という質問を發した．これが始まりで私は、以前水資源研究センターの客員教授でビデオゾンデ観測を実施しておられた雲物理学の大家であるハワイ大学高橋助教授（当時は九州大学教授）を思い出し、ハワイに連絡してすぐお弟子さんである山口大学の鈴木賢士准教授（現教授）を紹介いただいた．これらが、同期観測を実現させた．

さて、中谷宇吉郎先生というやはり雲物理学の大家がおられて、その歴史的に有名な先生は「雪は天からのお手紙である」と述べられ、地上に降ってきた雪を研究して何が上空で起こっている推測できると主張されていた．このお言葉をお借りすれば、私たちは待ちきれずに「手紙を天に取りに行こう」としたことになる．その結果、ビデオゾンデとレーダーの同期観測を世界で初めて実現した．

5.2 偏波レーダーの概要

ここで、Fig. 3を使って偏波レーダーとは何かを述べる．正確に述べると現業化されているのは二偏波レーダーである．実は二偏波レーダーというのは1980年台後半から新技術として建設省土木研究所で研究が進められ、九州地方建設局の釈迦岳レーダ雨量計として実用化していた（吉野，(1990)）．しかし、偏波切り替え技術の黎明期であったため、それほど従来の単偏波レーダーからの精度改善が認め

られなかった．その後2002年に沖縄で最新型レーダーCOBRAが世界で4機目として立ち上がった．

これまでの単偏波レーダーは電界が水平方向に振れる電波だけを使って，雨粒に当たって後方散乱(反射)されてくる電波の強さ(電力)を測定できるものであった．その受信電力が雨滴直径の3乗に比例するのであれば(雨滴の体積は3乗に比例するので)降雨量推定はそれほど難しいものではない．しかし，電力は直径の6乗に比例するので，降雨量推定には浮いている雨滴の粒径分布が必要である．

一方，二偏波レーダーでは縦、振れる電波をも同時に出すことによって，返ってくる縦横の電波の強さ(Zという)の差(Z_{DR} という)を利用して雨滴の粒径分布を推測できることが期待された．すなわち，落下する空気の摩擦で雨滴が大きいほど変形(扁平)しており，その扁平具合(形)を二偏波による受信電力の差から推定できると大きさも推定できる．しかし前述のように，受信の電力の差だけでは降雨量推定の向上が十分ではなかった．

COBRAのような1990年代後半から開発が進められた最新型偏波レーダーは，電波の強さの差だけではなく，返ってくる波の位相が縦横でずれる差(ϕ_{DP} , K_{DP} という)も観測することが可能である．それが革命的で，レーダー電波(レーダービームという)が通っているところの降雨量，降雨強度がかなり正確に測れるようになった．(真木ら, 2017)

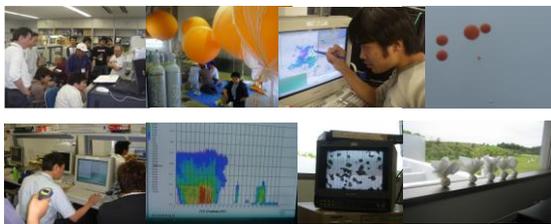


Photo 1 Activities in the Okinawa campaign observation

5.3 同期観測結果例

Photo 1 に情報通信研究機構沖縄亜熱帯電波計測センター(現沖縄電磁波技術センター)における同期観測の様子を示す．COBRAレーダーは20km離れたところに位置する．レーダー水平観測画面を注視することによって雨域のセンターへの到来を監視しつつ，到来が期待されるとビデオゾンデの放球準備を開始し，並行してレーダーを電波がセンター直上を通るRHI(鉛直断面観測)モードに切り替え操作をして，雨域の到来を待つ．

モニターに映っている粒は，カメラで映った上空で浮いている降水粒子で，地上に映像が送られ同時

に録画をする．雨がなかなか降らない時は，学生達は自主的にてるてる坊主を逆さにして雨乞いも実施する．沖縄への一回の訪問で約一週間(初年度は3週間)，20~30人の学生達と合宿をしながらこういった集中観測を実施してきた．

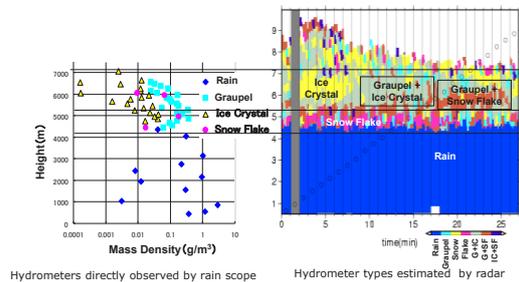


Fig. 4 Hydrometers observed and estimated by rain scope and radar, respectively

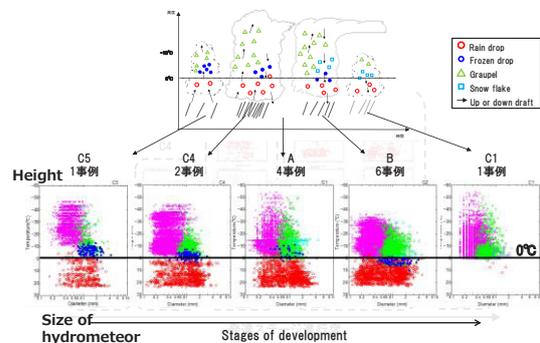


Fig. 5 Existing hydrometers types depending on life stage of single convective system (See Suzuki et al., 2023)

Fig. 4 は中北ら(2009)が示した図である．左図はSuzuki et al. (2012)によるビデオゾンデ(Rain scope)によって直接観測された降水粒子で，横軸は降水粒子の大きさ，縦軸は高度である．ビデオゾンデ観測だけでも，どのような種類の降水粒子が上空に存在するかが確認できる．たとえばこの図では，上に氷晶が存在し，それがあられになり，そして雪片になって最後に水になって落ちてくるというプロセスを推測できる．一方，右図はレーダーによる偏波情報から推測した上空に降水粒子のタイプである．偏波レーダーで形が推測できるのでこのようなタイプ推定が可能となった．右図は横軸は時間，縦軸は高さであり，そこへビデオゾンデが上昇してゆく様子を○印が示している．この上がっていく場所場所でのビデオゾンデ観測情報とレーダー推測を合わせて確認をする事によりレーダー推測の精度を評価することができる．これが同期観測で実現したい夢であった．

Fig. 5 はビデオゾンデ観測だけによる結果を単独

積乱雲のライフステージを軸に整理したものである (Suzuki et al., 2023) . 一つの積乱雲のたかだか1時間程度の寿命の中、生起しはじめからどんどん水蒸気が凝結して、凍結氷、それから氷晶、霰ができ、それがまた雪片になって雨として降ってくるという様子が、積乱雲の発達、成熟、衰退期という時間発展による降水粒子の構成の違いとともに明確に表現されている。こういう性質から、後述するように偏波レーダーから積乱雲が今どのライフステージにいるかを時間追尾することなく推測することができるようになる。

6. Xバンド偏波レーダーネットワーク (XRAIN)

6.1 XRAINとは

最新型Xバンド偏波レーダーが、2010年にまず京阪神、東京、名古屋と一部の豪雨災害のあった地域に導入され、初期のXRAINネットワークとなった。その後も主に政令指定都市をカバーする形でネットワークが拡大され、現在39機のXバンドの最新型偏波レーダーが全国にそして密に配置されるに至っている。また、XRAIN導入前から国土交通省では26機、気象庁では20機のCバンド大型によって2種類の全国ネットワークがあった。現在これらのCバンドレーダーのおおよそ3/4も最新型偏波レーダーに更新されている。

すなわち、2010年当時は前述の釈迦岳レーダ雨量計以外は一機のもCバンド最新型偏波レーダーは実現していない中、それに加えて、同じように偏波機能を有しかつ電波の波長が短いXバンドレーダーにより時空間的により細かく雨域を観測するXRAINとよばれるレーダー観測ネットワークが国土交通省により一挙に構築された出した。その概要をFig. 6 に近畿のネットワークを例に示す。

Cバンドの大型レーダーは120キロの半径で観測するのにに対して、XRAINの個々のXバンドレーダーは、

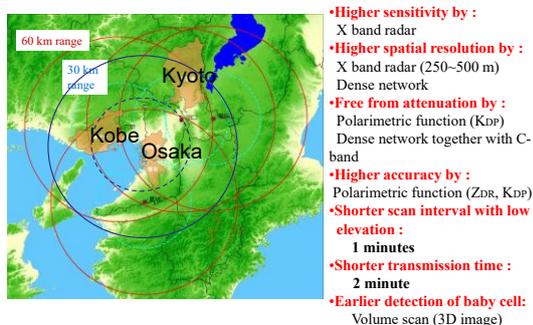


Fig. 6 Operational network as XRAIN with its properties and an observation area by another polarimetric radar as new Osaka City radar.

ここに示すように60~80キロの半径を観測範囲とし、しかしお互い非常に密な観測ネットワーク構成して、降雨減衰で強雨の向こう側が見えなくなるという電波波長が短いXバンドレーダーの弱点を、ネットワークを構成している他のレーダーとともに強雨の両側から観測することによって大きく補っている。

実は真木ら (2017) に有るように、防災科学技術研究所が独自にXバンド偏波レーダーを用いた研究用観測ネットワークを東京湾周辺に構築しており、これがXRAINのひな形となった。そこで構築された降水量推定アルゴリズムを利用することにより、国土交通省は素早くXRAINネットワーク構築に成功した。もちろん、降水量推定手法構築や後述のゲリラ豪雨早期探知などCOBRA研究を通して我々のグループもXRAIN導入に大きく貢献している。

国土交通省ではこれまで立体観測を標準とはしてこなかった中、このXRAINを構成する全Xバンドレーダーは、後で述べるゲリラ豪雨の早期探知を意識して、最初から立体観測を標準としている。

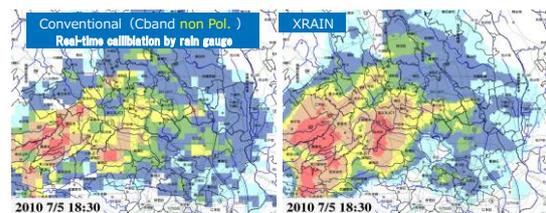


Fig. 7 Localized heavy rainfall in Tokyo metropolitan area estimated by conventional radar network (left) and XRAIN (right)

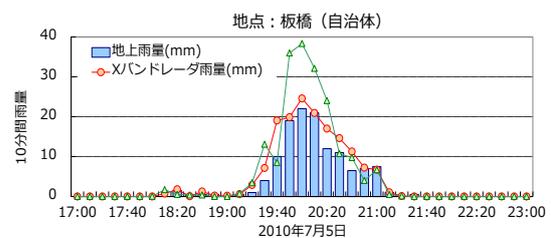


Fig. 8 Time series of a localized heavy rainfall in Tokyo metropolitan area estimated by conventional radar (left) and XRAIN (right) with observations by AMeDAS (see Maki et al., 2017)

XRAINが導入されるまではFig.7 左のように1 kmメッシュで5分ごとの平面的な観測だったのに対し、右に示すようにXRAINは250mメッシュで1分毎のきめ細かな観測となった。これにより、ゲリラ豪雨とよばれる積乱雲の一つ一つの雨域が非常に細かく見えるようになった。したがって、下水による雨水排除のための情報提供が可能となった。もとより、都

賀川のように流域面積が10平方キロもないような河川はこの積乱雲1個による降雨だけでも鉄砲水が生起するので、その鉄砲水の監視に非常に役立つことが期待されて導入された。

Fig. 8に、Fig. 7と同じ都市型豪雨の10分雨量時間系列を示す。緑がこれまでのレーダーによる推定値、赤がXRAINによる推定値で、縦棒がAMeDASによる地上観測値である。このように、降水粒子の粒径分布を推定する能力のあるXRAINによる推定値はこれまでの推定値を大きく改善していることがわかる。

6.2 XRAINの利用例

さて、Fig. 5とともに前述したように、積乱雲のライフステージ、すなわち発達期、成長期、さらに成熟して最後に衰退していく状況の中、上空の降水粒子の存在状況が変化する。

一方、前述したようにCOBRAを用いた沖縄観測実

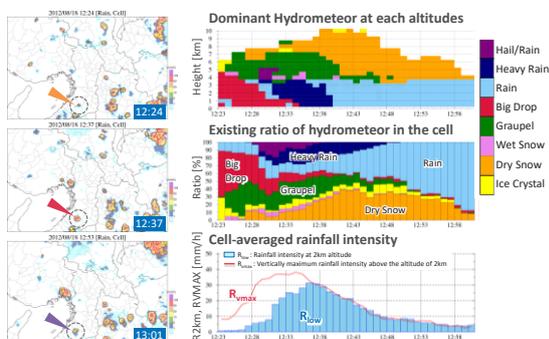


Fig. 9 Time series of a localized heavy rainfall in Tokyo metropolitan area estimated by conventional radar (left) and XRAIN (right) with observations by AMeDAS (see Masuda and Nakakita (2017))

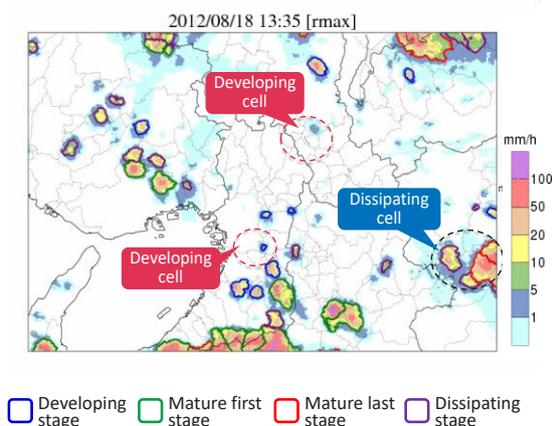


Fig. 10 Life stage of each single convective cloud estimated through hydrometer type estimations aloft by XRAIN (see Masuda and Nakakita (2017))

験で観測偏波情報から精度良く降水粒子識別ができる事がわかった。これをXRAINの立体観測に応用することによって、増田・中北 (2017) はFig. 9のように上空における降水粒子タイプやその存在割合を推定することによって、Fig.10のように個々の豪雨がどのライフステージの積乱雲からされているかを実時間で、過去の推移を見ることなく、推定することに成功している。この手法は7.で述べるゲリラ豪雨の危険性予測にも利用されている手法であり、さらなる発展を期待したい。

一方、降水粒子タイプの推定はメソ気象モデルを用いた豪雨予測にも、モデル同化という王道を通して豪雨の予測精度を改善できるポテンシャルを持っている。Fig. 11は2017年に生じた線状対流系による

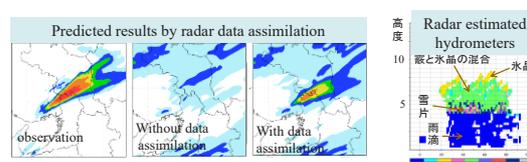


Fig. 11 Localized heavy rainfall predicted by data assimilation using radar estimated hydrometer (see Yamaguchi et al., (2017))

亀岡豪雨の予測実験を山口ら (2017) が行った結果である。レーダーで推定される大気下層の雨だけでなく上空の個体粒子のタイプに対して、CReSSと呼ばれるメソ気象モデルを同化させた予測実験の結果である。推定された降水粒子情報を予測に利用することによって予測精度を改善できることを示している。

7. ゲリラ豪雨の早期探知と危険性予測

梅雨明け後の2008年8月、神戸・都賀川や東京・雑司ヶ谷の下水道において、上流での局地的豪雨災害ではともに5名の命が失われた。それ以来、「ゲリラ豪雨」というキーワードが社会現象化し、都市域を中心とした局地的豪雨への関心が高まった。突然の豪雨も当然のことながら、それに伴う都市域の小河川の水位の急上昇（鉄砲水）がゲリラ豪雨災害の特徴であり、都賀川の場合は災害現場で降り始めてから7分後に出水が生じた。したがって、このような極端に短い時間スケールの災害では、5分でも10分でも早い注意喚起が防災上必要不可欠となってくる。

Fig. 12 に示すように、中北ら (2010) や Nakakita et al. (2107) は、1982 年以来継続的に立体観測を継続していた国土交通省深山レーダ雨量計（C バンドレーダー）の3次元画像を解析して、都賀川での鉄砲水の原因となった局地的豪雨、その豪雨をもたら

した積乱雲が急激に発生・発達するごく初期の段階に、上空でのみレーダーエコー（初期エコーあるいはファーストエコー）が確認できることを明らかにした。加えて、それが都賀川出水時の30分前には出現していることから、避難にとって極めて重要なゲリラ豪雨の早期探知に欠かせない情報であり、防災

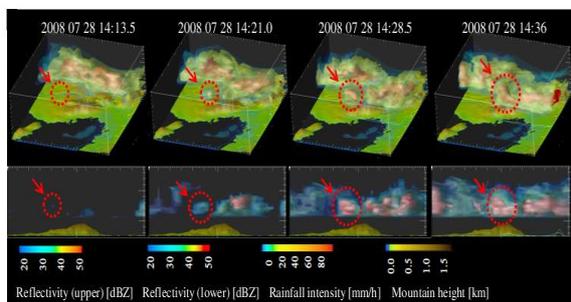


Fig. 12 Miyama Radar 3D observation images during the Toga River heavy rain. The top row looks southeast or northwest at each time, and the bottom row looks from south to North (See, Nakakita et al., (2010), Nakakita et al., (2017))

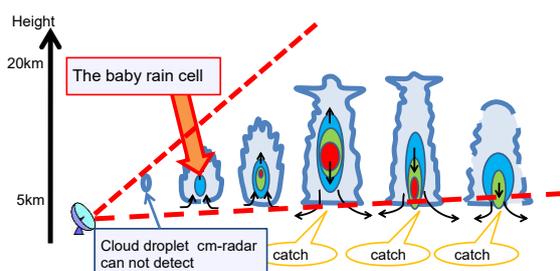


Fig. 13 Life stages and the baby rain cell of a single convective system (See, Nakakita et al., (2010), Nakakita et al., (2017))

の視点からこのファーストエコーの早期探知を現実化するべきとの提案を行い、そのファーストエコーを防災的観点から「ゲリラ豪雨のタマゴ」と命名した。

今少し Fig. 13 を用いて説明をする。図は、単独の積乱雲が発生、発達して成熟期を過ぎて消滅してゆく様子を示したもので、気象レーダーの立体観測によりこれらを捉えていることを示している。縦軸は高さ、軸は示していないが横軸は1時間程度先までの時間である。上昇流によって水蒸気が凝結して雲がまず形成される。雲粒の粒径はミクロンオーダーでありCバンドレーダーやXバンドレーダーといったいわゆる降水レーダーでは探知できない(Kaバンドレーダーといった雲レーダーでは探知できる)。その後、雲粒が集まりミリオーダーの粒径をもつ降水粒子が上昇流に支えられて上空でまず生成され出す。その後さらに多くの降水粒子が上空で形成され、上昇流で支えきれなくなると一挙に地上にたたきつけ

られるように降る。これが局地的豪雨(ゲリラ豪雨)である。時間を遡ると、豪雨時の10~20分前に上空でのみ降水粒子が形成され出す。レーダー立体観測ではファーストエコーとして上空で観測されることになる。前述のようにこのファーストエコーをゲリラ豪雨のタマゴと呼んでいる。

XRAIN 観測情報を調べたところ、多数の事例で、地上強雨がもたらされるより前に「ゲリラ豪雨のタマゴ」が上空で出現すること、積乱雲が強化される(最大降雨強度が50mm/h以上となった)場合はほとんど確実にドップラー風速により推測される鉛直渦度がある程度大きい値を持つことが中北ら(2013)やNakakita et al. (2017) 明らかとなった。

これらを結合して以下のようなゲリラ豪雨の早期探知・危険性予測システムが中北ら(2014), Nakakita et al. (2017) によって構築されている。

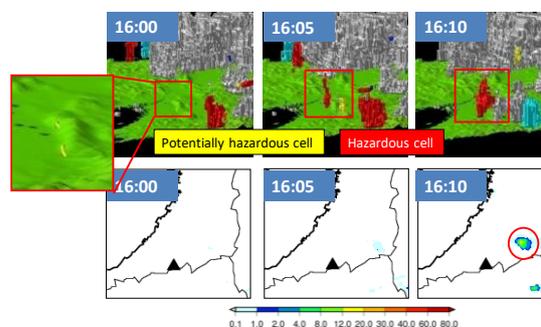


Fig. 14 Early detection by radar first echo of heavy rain and risk prediction using vertical vorticity (See, Nakakita et al., (2014), Nakakita et al., (2017))

Fig. 14 はタマゴによるゲリラ豪雨の早期探知と鉛直渦度による危険性予測例を示したものである。上段が XRAIN で捉えられた積乱雲の3次元形態、下段が XRAIN のプロダクトとして実時間でウェブ公開されている地上降雨強度の推定値である。16:00にタマゴが探知され黄色で表示されている。5分後の16:05には上空へと発達したタマゴが赤色で表示されている。黄色はタマゴ探知時点から高い鉛直渦度が算定されていることを示し、赤色は自動追尾した5分後でも高い鉛直渦度が算定されて居ることを示す。ともに、最大降雨強度が50mm/h以上となる(以下では「危険なゲリラ豪雨になる」と記す)危険性が高いことを示しており、特に赤表示はほとんど確実に危険なゲリラ豪雨になるとの意味で用いられている。また、上空で黄色表示された時点では地上に降雨がもたらされていないことがわかる。そして、地上に弱雨がもたらされた時点では、すでに上空の表示が赤色になっている。ちなみに、水色で表示され

ている積乱雲は、初期に高い鉛直渦度が算定されたものの5分後には低い鉛直渦度となったものを示しており、空振りを少なくするための表示である。以上が京都大学で開発したシステムである。

国土交通省近畿地方整備局では、上記システムの実運用化を並行して進め、2014年から試験運用を開始し毎年システムの改良を進めている（片山ら(2015)）。研究室での開発哲学は、“見逃さない手法を構築して人の生命を守る”であるため、“危険化するゲリラ豪雨は初期から高い鉛直渦度を保持する”という事実を利用した。しかし、実運用システムとしては、これに加え“空振りを少なくする”ことも大切なこととなる。そのため、鉛直渦度だけでなく、エコー頂、その発達速度やドップラー風速から推定さ



Fig. 15 Operational system of early detection and risk prediction by the MLIT (See, Nakakita et al., (2010), Katayama et al., (2015))

れる水平風の収束・発散なども指標として危険性予測するシステムとしている。Fig. 15は、近畿の市町村、大阪管区気象台、気象庁本庁、国土交通省に公開されている「局地的豪雨探知システム」である。XRAINによる降雨強度表示用ウェブ画像の上に、タマゴが探知された時点に色のついた輪が表示される。輪の色（黄色、朱色、赤色）が危険度ランク、輪の大きさが上空に浮いている積乱雲の体積（レーダーエコーの体積）を示している。また、カーソルを重ねると、渦度などの指標の数値が表示される。現在、見逃し、空振りともに20%程度の精度で運用されている。なお、XRAINでは全国的に通常は5分ごとの立体観測、1分ごとの地上観測を実施している。しかし、近畿地方整備局では、5台のXバンドレーダーの連携オペレーションにより、近畿地方の京阪神周辺上空に対しては1分ごとの立体観測を実現し、1分ごとに表示を更新している。

8. ゲリラ豪雨における渦管の役割

さて、危険性指標として用いる渦度は、統計的に判断しているだけではないか、との批判がくるかもしれないので、以下少しメカニズムな説明を加える（Fig. 16 渦管ペアが生成される概念図）。梅雨の時はこの環境場の水平風が吹いている方向が延長方向に回転するのに比べ、単独の積乱雲の場合はこのように回転は殆どない状態で速さだけ高さ方向に変化する。下の方がゆっくり、場合によっては奥方向を向いていて、上の方が手前を向いてると、爪楊枝や串カツの串を水平にFig. 16左図のように置くと、図に示したようにぐるぐると串が回転することをイメージできる。これが熱の上昇流とかによってねじ上げられると、鉛直に立った部分の左は左回転に、右は右回転になる。すなわち、正負正反対の渦がペアとして並ぶことになる。

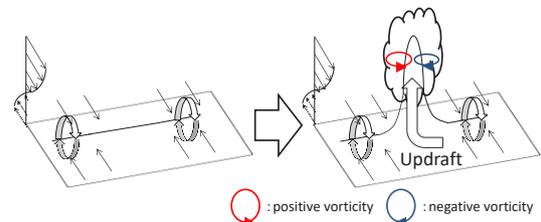


Fig. 16 Conceptual behavior of vortex tube in a

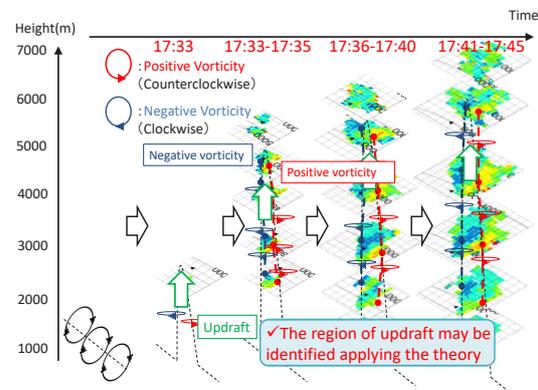


Fig. 17 Observed behavior of vertical vortex tube in a convective sever storm (See, Nakakita et al., (2016), Nakakita et al., (2017))

早期探知システム構築の初期では、ここまでのイメージはなく、一本の渦管があってコマのように回転しているというイメージであった。すなわち、コマが回転するように渦度が保存されて鉛直に伸びる積乱雲はすごく安定するだろうというイメージであった。しかし、Fig. 17に示すRotunno, (1981)によるスーパーセル（巨大積乱雲）に対する渦管の概念

図から、スーパーセルでない通常の積乱雲でも回転する水平渦管が立ち上がっているのではないかと推測をし始めた。すなわち渦管のイメージが変わった。それをレーダー情報から確認したところ、中北 (2016) , Nakakita et al. (2017) はFig. 17に示すように、必ずしもスーパーセルではない小さな積乱雲でも同様な綺麗な構造になっていることを発見した。これは世界で初めて発見と考えている。この図は、縦軸に高さ、横方向に時間をとっている。渦がプラスの方向か負の方向かによって赤色と青色に表示している。5分ごとの立体構造を示していて、段々とエコーが高くなっていきながらも負の渦の軸と正の渦の軸が綺麗にイメージどおりに並んでるのがXRAIN観測でしっかり見える事を示している。別途、渦管のペアの間に上昇流が存在していることもレーダー観測情報から確認されている。

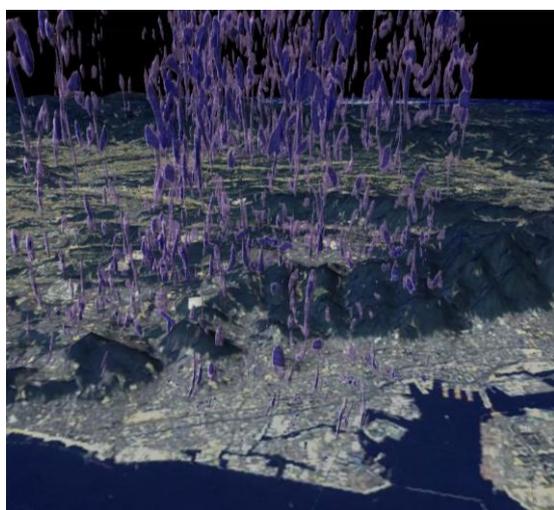


Fig. 18 Behavior of vortex tubes simulated by a LES model (See, Yamaguchi et al., (2016))

加えて、数値シミュレーションでも同様のことが確認できている。Fig. 18は山口ら (2016) が開発した、より時間空間的に積乱雲をシミュレーションできるLES数値モデルによる渦管の振る舞いを示している。渦管が立ち上がって曲がっていくのが確認できる。すなわち、Fig. 19のレーダーで見たのと同じようなことが至る所で起こっていることと推測できる。

9. おわりに

これまで、気象レーダーで見える雨粒の発現をタマゴとして観測研究、システム開発を行ってきた。さらには、気象レーダーで見える前、すなわちタマゴが生成される前に雲だけの状態がある。さらにそ

の前には雲がまだできていない上昇流だけの状態がある。これらも早期のシグナルとして探知することにより早いゲリラ豪雨の探知ができるはずである。それには、雲粒はより電波波長が短い雲レーダー、気流はライダー（レーザーレーダー）が有効であることも中北ら (2018) は明らかにしている。また、先ほどのLESモデルによる数値シミュレーションも併用しながら、本当に最初の積乱雲の発生について偶然、必然というものの考え方もベースにしながさらさらに追求する研究も行っている。また、この追求が後任の山口教授をリーダーとして多くの皆さんで進められている気象制御とも繋がってくると考えている。すなわち、積乱雲発生に関する科学的に根源的な問いと研究、そしてそれが今後のより安全で安心な世界、すなわち人々をハッピーにして笑顔をもたらす世界の構築に貢献して行ってくれることを切に願ってやまない。

謝 辞

これまで研究を一緒にいただいた山口弘誠准教授（現教授）をはじめとした教員、職員、学生の皆様、全国・海外の研究仲間の皆様、国土交通省などの行政の皆様、コンサルタンツ・電力・鉄道などの民間の皆様にご心より御礼を申し上げます。家族も含め、皆さん本当にこれまでお世話になりました。ありがとうございました。皆さんの今後のご活躍を祈念します。また、令和4年、すなわち私の所長2年目の秋に逝去されました辻まゆみ秘書には計り知れないくらいのお世話になりました。深く御礼を申し上げますとともに、心よりご冥福をお祈り申し上げます。また、本稿の作成に当たり、日本気象協会の増田有俊氏には技術的なサポートを頂きました。深く謝意を表します。

参考文献

- 片山勝之・山路昭彦・中村文彦・森田宏・中北英一 (2015) : 局地的豪雨探知システムの開発, 河川技術論文集, Vol.21, pp.401-406.
- 椎葉充晴・高棹琢馬・中北英一 (1984) : 移流モデルによる短時間降雨予測の検討, 土木学会水理講演会論文集, 第28巻, pp.349-354.
- 中北英一 (2010) : 「集中豪雨のモニタリングと予測」, [特集] 防災の水工学, 日本流体力学会誌「ながれ」, 第29巻, 第3号, pp.203-210.
- 中北英一 (2022) : 「気候変動影響将来予測と治水目標の見直し」, 特集「流域治水」, 土木学会誌, 第107巻, 第6号, pp.22-25.

- 中北英一・佐藤悠人・山口弘誠 (2016) : ゲリラ豪雨のタマゴ生成時における渦管構造の基礎的解析, 土木学会論文集, B1(水工学), 第72巻, No.4, pp.199-204.
- 中北英一・椎葉充晴・池淵周一・高棹琢馬 (1988) : 三次元レーダー雨量計情報の可視化, 土木学会論文集, 第393号/II-9, pp.161-169.
- 中北英一・椎葉充晴・池淵周一・高棹琢馬 (1990) : 3次元レーダーを利用した降雨予測手法の開発, 土木学会水工学論文集, 第34巻, pp.91-96.
- 中北英一・砂田憲吾 (1997) : 琵琶湖プロジェクト-その歩みと現在-, 第5回水資源に関するシンポジウム論文集, pp.689-694.
- 中北英一・田中 実・椎葉充晴・池淵周一・高棹琢馬 (1992) : 3次元レーダーエコー強度情報を用いた水蒸気相変化量と大気3次元風速の同時推定手法, 土木学会水工学論文集, 第36巻, pp.483-488.
- 中北英一・筒井雅行・池淵周一・高棹琢馬 (1988) : 降雨分布特性の気象力学的解析, 土木学会水理講演会論文集, 第32巻, pp.13-18.
- 中北英一・新保友啓・佐藤悠人・山口弘誠・大東忠保 (2018) : Kaバンドレーダーを利用した積乱雲生成段階に関する研究, 土木学会論文集, B1 (水工学), 第74巻, No.4, pp.55-60.
- 中北英一・西脇隆太・山邊洋之・山口弘誠 (2013) : ドップラー風速を用いたゲリラ豪雨のタマゴの危険性予知に関する研究, 土木学会論文集, B1(水工学), 第57巻, pp.325-330.
- 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 Vol.64, No.12, pp.850-872.
- 増田有俊・中北英一 (2014) : Xバンド偏波レーダを用いた降水セルのライフステージ判別手法の開発, 土木学会論文集, B1(水工学), 第70巻, No.4, pp.493-498.
- 山口弘誠・高見和弥・井上 実・中北英一 (2016) : 豪雨の「種」を捉えるための都市効果を考慮するLES気象モデルの開発, 土木学会論文集, B1(水工学), 第72巻, No.4, pp.205-210.
- 山口弘誠・古田康平・中北英一 (2017) : XRAINを用いたアンサンブル同化による線状降水帯の維持と発生の予測, 土木学会論文集, B1 (水工学), 第73巻, No.4, pp.211-216.
- 吉野文雄 (1990) : 直行二偏波レーダーによる降水観測研究の動向, 天気, Vol.27, No.3, pp.3-17.
- Nakakita, E. (2013) : Scientific and Integrated Research by In-situ Campaign Observations Synchronizing Polarimetric Radar with Video-Sonde, Journal of Disaster Research, Vol.8, No.1, pp.157-158.
- Nakakita, E., S. Ikebuchi, T. Nakamura, M. Kanmuri, M. Okuda, A. Yamaji and T. Takasao (1996) : Short-term rainfall prediction method using a volume scanning radar and GPV data from numerical weather prediction, Journal of Geophysical Research, Vol. 101, No. D21, pp.26181-26197.
- Nakakita, E., H. Sato, R. Nishiwaki, H. Yamabe and K. Yamaguchi (2017) : Early Detection of Baby-Rain-Cell Aloft in a Severe Storm and Risk Projection for Urban Flash Flood. Advances in Meteorology, 2017, Article ID 5962356, pp.15.
- Rotunno, R. (1981) : On the evolution of thunderstorm rotation, Monthly Weather Review, Vol. 109, No. 3, pp. 577-586.
- Suzuki, K., M. Matsuo, E. Nakano, S. Shigeto, K. Yamaguchi, and E. Nakakita (2013) : Graupel in the different developing stages of Baiu monsoon clouds observed by videosondes, Atmospheric Research, pp.100-110.
- Suzuki, K., K. Shimizu, T. Ohigashi, K. Tsuboki, S. Oishi, S. Kawamura, K. Nakagawa, K. Yamaguchi, and E. Nakakita (2012) : Development of a New Videosonde Observation System for In-situ Precipitation Particle Measurements, SOLA, 2012, Vol. 8, pp.001-004, doi:10.2151/sola.2012-001, 2012
- Tsuboki, K. and A. Sakakibara (2001) : Cloud Resolving Storm Simulator, User's Guide, Second Edition. 210p

(論文受理日 : 2015年10月27日)