

# 最新型気象レーダーによる豪雨の観測と早期探知・予測 — 鉄道の安全運行に向けて —

京都大学 防災研究所教授  
中北 英一



## 1. はじめに

気象レーダーは、上空に浮かぶ雨粒などの降水粒子を探知してその量や種類を推測するのに用いられ、広域大雨～局地的豪雨の探知に大いに活用されている。また、それらの移動速度を探知して風速をはかり、豪雨の餌となる水蒸気の流入経路や竜巻の探知に利用される。これらの情報は、河川の出水、内水氾濫・都市浸水、土石流・斜面崩壊、橋りょうや車両・船舶・航空機への強風などの実時間でのリスク把握や予測を通して、ダム貯水池の実時間運用を含めた河川の管理（電力ダムも含む）、排水ポンプの実時間運用を含む雨水排除、自治体による避難勧告・指示の発令や住民自らの避難の開始、鉄道・道によってもたらされるので、この立体観測はモニタリングという意味でも予測という意味でも重要である。

本稿では、災害と豪雨という視点を大事にしながら、気象レーダーによる豪雨情報が鉄道に利用できるいくつかの要素を紹介する。

## 2. 災害をもたらす豪雨

### (1) 3つの豪雨タイプ

ここ何年にもわたりゲリラ豪雨、そして梅雨前線・台風等による集中豪雨・大規模豪雨による鉄砲水・斜面崩壊、内水や超水氾濫による災害が生じ、以前にも増して社会の注意が払われるようになってきている。その注目の大きな理由は、最近あまり経験してこなかったと社会が考える規模や形態の豪雨や出水が生じていることと、10数年前からようやく防災関係者に認識されつつある地球温暖化、それによる影響ではないかと社会一般でも思うようになって来ていること、一側面であるが、これらにあると考えることができる。

では災害をもたらす豪雨として、台風や低気圧による豪雨、梅雨時その他の集中豪雨、そしてゲリラ豪雨と呼ばれる局地的集中豪雨とではどこが違うのだろうか？図1に示すように、台風による豪雨は1000km四方の広がりですべて1日～数日の継続時間を持つので、数1000km<sup>2</sup>より大きな流域をもつ河川でも洪水をもた



図1 災害をもたらす豪雨

らず危険性があり、大規模水害の想定対象でもある。もちろん土砂災害も生起する。一方、梅雨時の通常の集中豪雨は、100km程度の長さで10～20kmの幅をもち、6時間～半日程度継続するので、流域面積が100km<sup>2</sup>オーダーまでの流域面積をもつ中・小河川および内水氾濫が問題となる。台風による豪雨と同様に土砂災害も生起する。ゲリラ豪雨は10km四方の広がりでも時間的には1時間以下の継続時間であるから10km<sup>2</sup>程度の小河川や下水道内での鉄砲水、都市内水氾濫が問題となる。

後述するように、2008年の7月末、8月初めの神戸の都賀川や東京の雑司ヶ谷の下水道管での災害はゲリラ豪雨災害によってもたらされたものである。一方、2012年の九州北部豪雨、2014年の広島豪雨、本年の浜田豪雨、九州北部豪雨は梅雨時の後方形成型の線状降水帯による集中豪雨災害であり、自ら水蒸気呼び込むよう自己組織化・自律した積乱雲群によりもたらされる帯状の降水帯である。なお、2016年の鬼怒川災害をもたらした線状降水帯は台風と台風崩れの熱帯低気圧が水蒸気流れの収束域・上昇流域を強制的につくることにより生起した帯状の降水帯であり台風が動かない場合は寿命が1日以上続く。

## (2) 集中豪雨とは？

「ゲリラ豪雨」も「通常の集中豪雨」も積乱雲によってもたらされる。「大気が不安定」な時に発生し、縦方向のはるか上空まで発達し、何10万トンという水を上空に発生・蓄積させ、やがてはそれらを落して地上に豪雨をもたらす。いわば、大気の破壊現象である。図2に示すように、典型的な集中豪雨では、最初に発生し移動しながら発達する積乱雲のすぐ後ろに繰り返して新たな積乱雲が発生し、赤ちゃん・幼稚園児・小学生・高校生・大人の積乱雲による家族が形成される。一つの積乱雲の寿命は高々30分～1時間程度だが、積乱雲の家族が一旦形成されるとその家族は6時間以上の長きにわたり持続されるので、6時間～半日程度という長い時間の豪雨をもたらす。気象レーダーでは徐々にその家族が近づいてくるのがわかる。一方、ゲリラ豪雨は積乱雲の家族とは別に、晴れている中でも突然に単独の積乱雲が発生し急激に成長する。家族が形成されだすときの最初の赤ちゃん雲の発生と同じで、突然発生し、かつ急激に発達するので気づきにくく、レーダーでも予測が難しい。

## 3. 気象レーダーの利用

### (1) 雨を測るレーダー

図3は国土交通省の赤城山レーダ雨量計によって観測された1998年8月27日に生起した那須豪雨の3次元構造を示したものである<sup>1)</sup>。梅雨時に典型的な積乱雲による豪雨が線状に並んだ状況が観測されている。図中に示すように、気象レーダーとはアンテナから発射する電波が降水粒子にあたって反射してくる電波を同じアンテナで受信して、受信電波の強弱で降水強度を測るレーダーである。どこから返ってきた反射電波かは、アンテナの向きと発射した電波がアンテナに返ってくるまでの時間で特定される。また、アンテナ

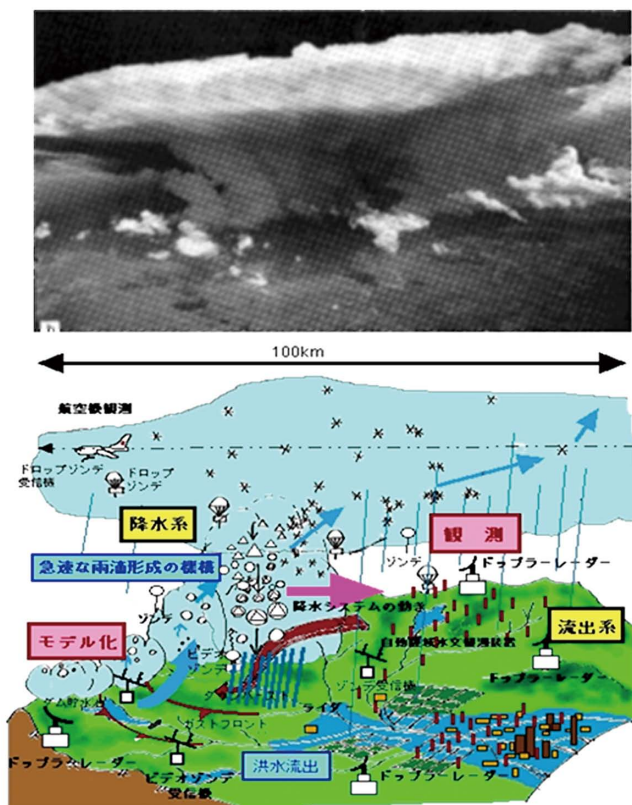


図2 集中豪雨時の降水システム

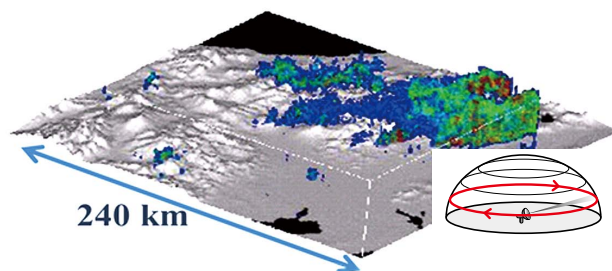


図3 気象レーダーによる集中豪雨の立体構造の観測事例(国土省赤城山レーダ雨量計による那須豪雨観測事例)



雨災害を機に、都市の豪雨災害の軽減を目指して全国の政令都市をカバーするように国土交通省が2010年度から導入を開始した小型(Xバンド)のMPレーダーによる3次元観測網(XRAIN)を紹介する。図4に示すように、九州～北海道に至る主に政令指定都市をカバーする39機のXバンドMPレーダーによる3次元観測網(旧XRAIN)が実現し、きめ細かな時間・空間分解能(1分間隔・250m分解能)で精度の高いリアルタイム降雨分布情報が、観測から1分程度で配信されるようになってきている<sup>2)</sup>(図5)。このため、気象学、水文学を超えたさまざまな分野での利用手法の開発が急激に進んでいる。XRAINは、よりピンポイントでより正確な降雨量を観測するとともに、立体観測により早期にゲリラ豪雨を探知し、およそ1分以下というより短時間での情報提供ができるという最新性をもつ。加えて、ドップラー機能によって風速や渦度も観測する

ことで、降雨予測精度のさらなる向上を目指している。なお、国交省ではCバンドレーダーのMP化も進めており、CバンドMPレーダー+XバンドMPレーダーによる1分間隔、250mメッシュでの降雨分布情報を2016年度から新たにXRAINに改称し、2017年度からは北海道東以外を対象にウェブで降雨情報が提供されている<sup>3)</sup>

#### 4. ゲリラ豪雨の早期探知と危険性予測

2008年の7月末、8月初めに続いて生じた神戸の都賀川や東京の雑司ヶ谷の幹線下水道管での災害はゲリラ豪雨によってもたらされた鉄砲水によるものである。都賀川の場合、憩いの場での笑顔が一瞬にて失われる災害で、降り始めてから7分後に出水が生じた災害である。

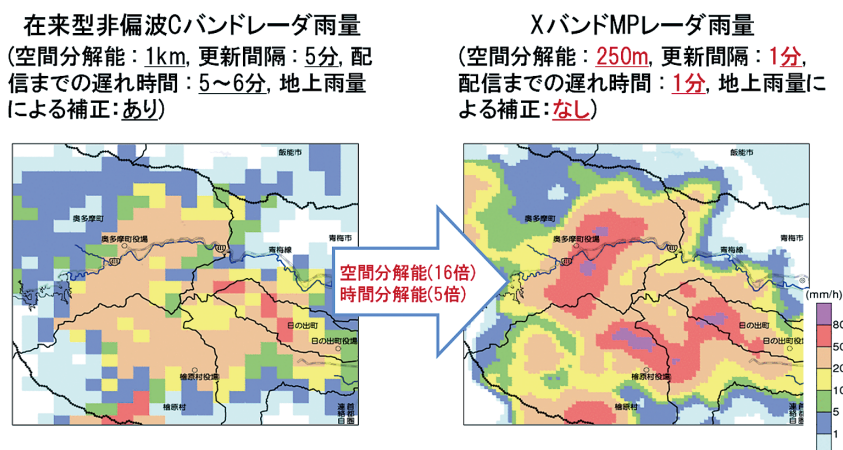


図5 XRAINによる降雨観測のアドバンテージ(出典: 国土交通省)

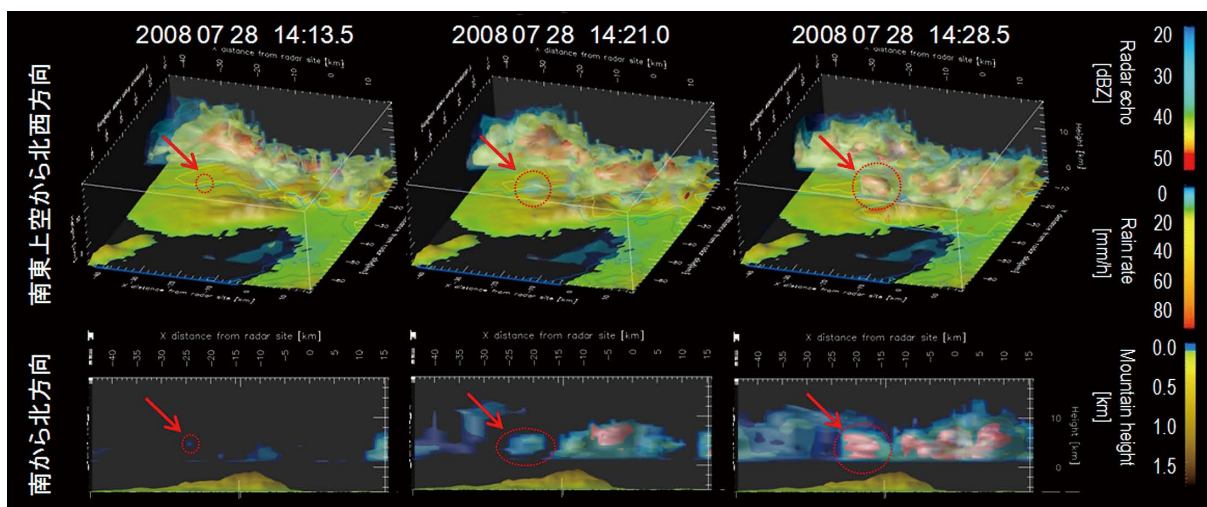


図6 都賀川豪雨時の深山レーダー立体観測画像。時刻毎に上段は南東から北西方向を見たもの、下段は南から北方向を見たもの<sup>4)-6)</sup>

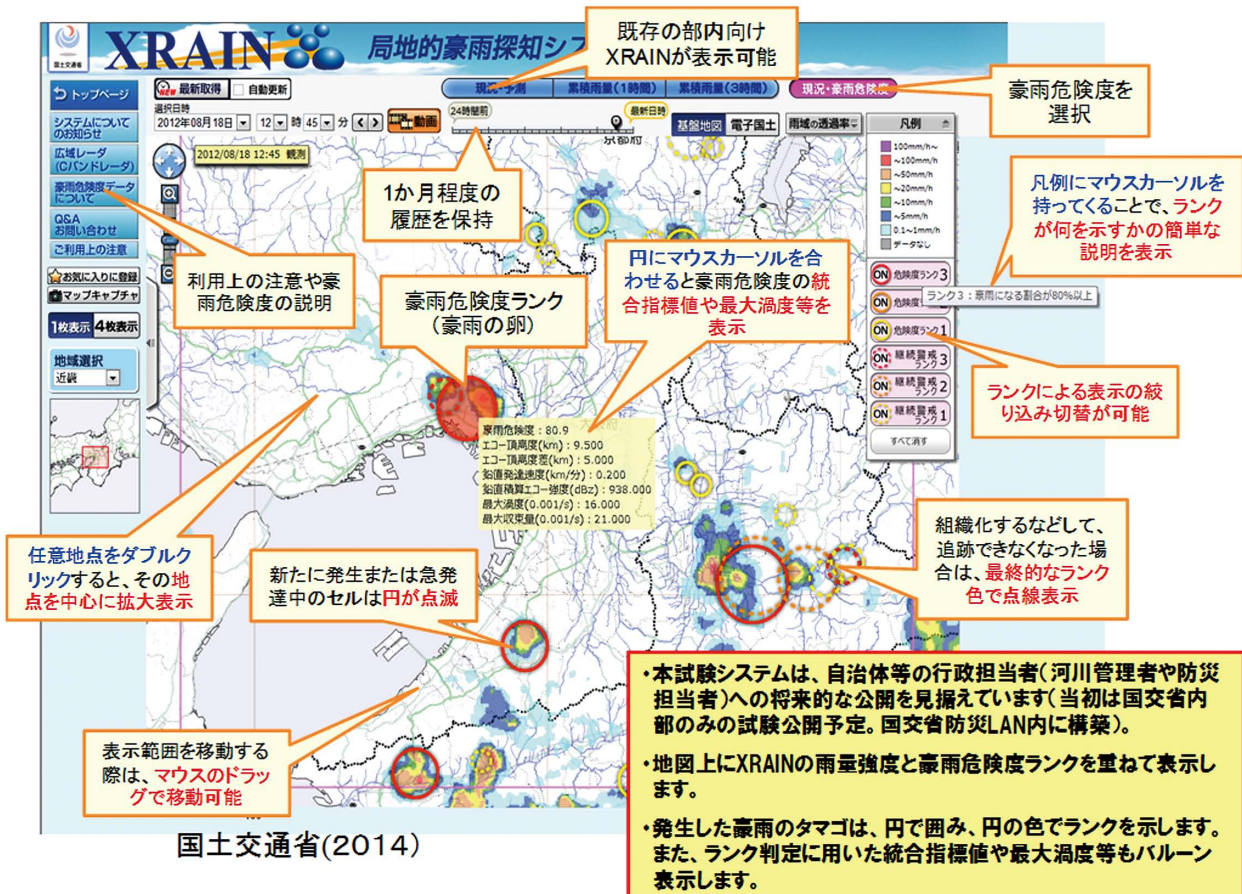


図7 国土交通省によるゲリラ豪雨の早期探知・危険性予測システム<sup>7)</sup>

筆者らは、1982年以来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、上空でのみ最初に存在するレーダーエコー(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<sup>4)</sup>。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、ゲリラ豪雨による鉄砲水からの早期避難に欠かせない情報であり、このファーストエコーの早期探知を実現・実用化す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<sup>4)</sup>。

図6は、国土交通省深山レーダ雨量計によって7分半ごとに観測された2008年の都賀川ゲリラ豪雨を3次的に示したものである。積乱雲の発生直後、上空の高度5~7kmでのみ降水粒子が形成し始めている段階(ゲリラ豪雨のタマゴ)からの状況を立体観測レーダーでは捉えることができることを示している<sup>4)</sup>。これは、ゲリラ豪雨の早期探知や大気モデルを用いた降

雨予測にも重要情報となる。

一方、前述のように国土交通省は、2010年から順次、XRAINを配備し、3次元ドップラー観測を標準としたゲリラ豪雨災害への観測体制を強化した。筆者らはXRAINで観測された多数の事例を用いて、積乱雲が強化される際には、地上強雨を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、ドップラー風速により推測される渦度がほぼ確実にファーストエコーの段階から確認されることを、明らかにした<sup>5)</sup>。加えて、タマゴの早期探知手法と追跡手法、並びに危険性予測手法を統合したゲリラ豪雨予報システムのプロトタイプを構築した<sup>6)</sup>。

並行して、国土交通省は筆者らと共同して、XRAINの実用化直後から、XRAINを用いたゲリラ豪雨の早期探知・危険性予測の実用化を目指した取り組みを進め、大阪・神戸・京都を含む近畿地域において、豪雨警戒ランクを3段階で判定する手法を開発し、Web表示するシステムを構築した(図7)<sup>7)</sup>。現在いくつかの地方自治体や気象庁を対象に試験運用を継続している。

## 5. レーダーによる時々刻々の雨域情報を用いた運動学的な予測手法（雨域追跡による降雨予測）

1970年代に、国土交通省によってCバンドレーダーが導入されて以来、水工学の分野で多くの降雨予測手法が提案されてきた。基本的には、時々刻々と得られる面的な降雨分布の変化（動きと発達・衰弱）を数理工学的手法で捉えて、外挿することによって予測する手法（運動学的な予測手法）である。セルを認識させ追尾する手法<sup>8)9)</sup>や、2次元流体場として降雨場の変化を移流方程式で把握し予測する手法（移流モデルによる手法<sup>10)</sup>がある。これらは様々な場で今も利用されて来ている。残念ながら、5分ごとの観測情報を用いた従来の場合、我が国の大河川を対象にした場合は1～3時間（1～3km空間分解能）、中・小河川では1時間（1～3km空間分解能）、都市の雨水排除を目指した予測では（20分）程度の子測リードタイムしか有効な予測を行えなかった。また、その予測精度もあまり高くなかった。主な理由は、移動する雨域の発達や衰弱の予測が簡単ではなかったからである。

XRAINによる1分間隔で250m空間分解での豪雨の観測により、一つ一つの積乱雲の存在とその消長をきめ細かく捉えられるようになったため、レーダー画像を用いた雨域追跡による降雨予測の精度が、一つの積乱雲の寿命である30分～1時間先までの予測であれば、従来に比べて大きく向上することが見込まれて

いる<sup>8)9)</sup>。図8は、一つ一つの降雨セルを追跡することにより行われた、20分先の降雨予測事例を示している<sup>7)</sup>。雨域毎に過去の移動を算出しそのまま将来も移動させることにより、将来の位置を良好に予測するとともに、初期時刻における雨域の面積および雨域内の平均降雨強度の直近変化率を外挿することにより各セルの発達・衰弱をも良好に予測していることがわかる。

## 6. 鉄道の安全運行などへの気象レーダーによる豪雨情報の利用

### (1) 安全性向上と安定性の確保

鉄道の運転規制、速度規制には、路線に沿って5～10km間隔で設置されている地上雨量計による降雨量や降雨強度が利用されている。その際問題視されてきているのが運転規制以上の雨量が雨量計設置場所間でもたらされていないかどうか、すなわち観測雨量の空間代表性である。一方、XRAINによる情報は250mメッシュで降雨強度情報が得られるので、250m間隔に雨量計があるかのような効果が見込まれ、雨量が運転規制値を超えるのを見逃すリスクが減る。すなわち、雨量計設置場所の間で運転規制値を超える雨量が観測される頻度が高くなる。その運転規制雨量を超えれば確実に切り土や盛り土が崩れるのなら、警戒対象の見逃しが減ることになる。しかし、安全側で運転規制雨量が設定されている場合は、警戒対象が発生しないにも関わらずより頻繁に運転規制をかける頻度が、雨量計

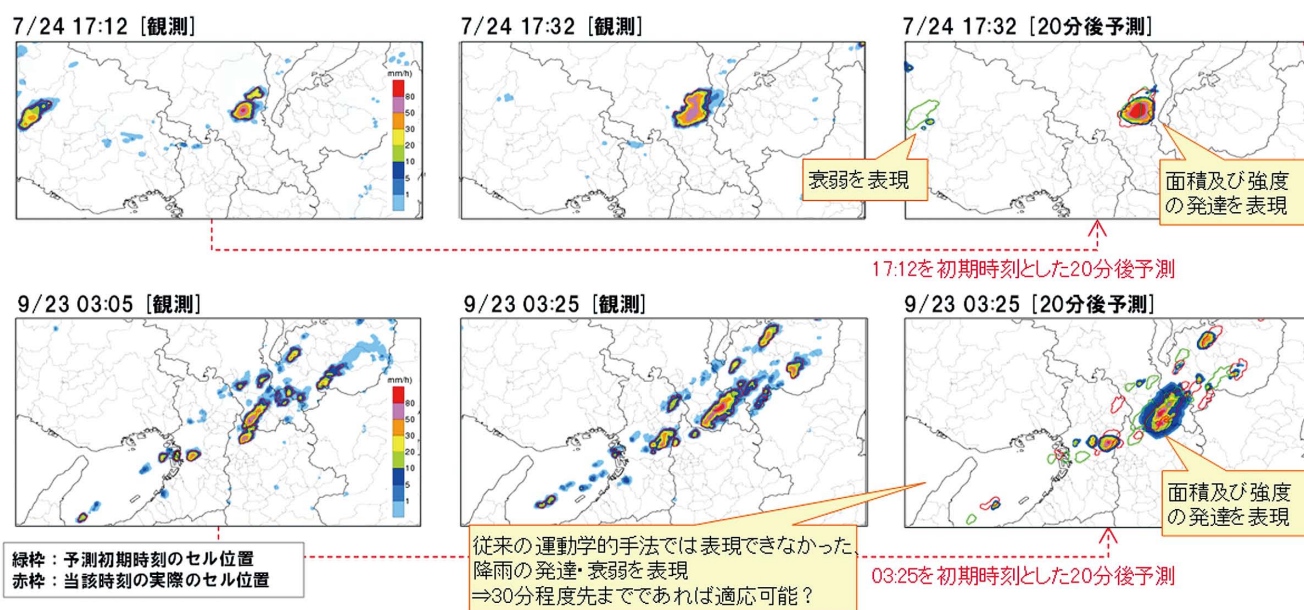


図8 XRAINによる降雨観測情報を用いたセル追跡法による降雨予測<sup>8)</sup>

だけを用いた場合に比べて増す<sup>11)12)</sup>。これは、システムの不安定性(利便性の低下)をもたらす。したがって、A) 安定性低下の許容範囲を広げるか、B) 運転規制値を警戒対象に対して遊びの少ないより正確な値とする、をしないとレーダーによる空間的に細かな降雨情報を生かし切ることはできない。

## (2) レーダーによる降雨予測情報が有効となる可能性

気象庁が予報する台風の進路や総降雨量などの情報は、今夕から間引き運転や運行停止するアナウンスを早めに行うことにより早期退社を促して安全性を担保しながら混乱を避けることに利用されている。それでは、レーダーによる予測情報はどのように利用可能であろうか？

運転規制値に達する見込みを5分、10分前に得て、駅間で列車を停車させることなく手前の駅か次の駅のどちらで停車させるかという判断に利用できるはずである。勿論、予測精度を事前に評価して最適な利用方法を決めておくことも肝要である。たとえば、台風のように雨域が広い場合は1時間程度以上先の降雨予測の精度は実用域にある。その一方、ゲリラ豪雨のような局所的な豪雨の発生予測は難しく、さらにレーダーで捉えられてから20分程度先までの予測も厳しかったが、既に述べたように、前者は3次元観測情報とドップラー観測による鉛直渦度情報を利用したゲリラ豪雨の早期探知・危険性予測により50mm/h以上の雨が降り出す30分程度前から危険性が予測できるようになっている。また、後者に関してXRAINによる1分ごとの降雨分布情報の出現により、20~30分先の発達・衰弱を含めた予測も可能となっており、これらの情報の運転規制による列車の停車位置への利用のポテンシャルは高く<sup>13)14)</sup>、この目的を意識した精度評価に期待したい。

もう一つ、古い基準による河川の橋梁橋脚は出水時の流体力に弱いため、危険な橋脚による出水をレーダー観測/予測情報を用いた洪水流出計算によって予測するというのも、大いにポテンシャルの高いレーダー情報の有効利用としてあげることができる。

以上、幾つか述べてきたが、4. で紹介したゲリラ豪雨の早期探知・危険性予測と、5. で紹介した運動学的予測手法あるいは気象庁の高詳細ナウキャストを旨く連結(ハイブリッド化)して利用手法をつくってゆくことが肝要である。しかしいずれにせよ、「活用目的に応じた予測精度」をしっかりと評価して、どのように利用するか工夫することが肝要である。

## (3) 偏波レーダー情報の利用

偏波レーダーは上空に浮いている降水粒子の種類を推定する能力を有している<sup>15)</sup>。それらをどう有効活用するかも大切である。すなわち、これから落ちてくる降水粒子が雪かどうかの判別が可能である。それを利用して、もうすぐ雨が次第に雪に変わることをレーダー情報から推測できる。このような試みの現業化は国土交通省で進められている。

また、レーダー推定される上空降水粒子タイプの混在状況に応じて、積乱雲が発達期か、成熟期か、衰退期かを過去経緯を調べることなくその時点で判断することも分かってきている<sup>16)</sup>。こういった情報も加味されれば(2)の降雨予測精度の向上も見込むことができると考えている。

## (4) 土木分野に求められる気象予測に対する共通スタンス

気象予測に期待される理想的な情報は、もちろん精度が高く時間・空間的に細かな定量的な情報であろう。しかし、精度の高い定量的な情報提供を気象分野に依存するだけでは極めて不十分であり、土木分野として以下の2つが大事である。すなわち、

- 1) 土木分野も率先して、必要とする気象予測情報の創出や精度向上に自ら取り組むこと。(目的を意識した土木分野自らの気象予測手法の開発)
- 2) 精度や時間分解能に制約があることを前提に、目的に応じた気象予測情報の高度な利用手法を開発すること。(目的を意識した高度な土木分野への利用手法の開発)

である。私自身はこれらを大切なものとして進めてきた。また、

- 3) どこまでの予測精度が実現すればいかなる高度な実時間管理が可能となるか、を明らかにすること。(精度向上を求める気象予測情報の土木分野から見た明確化)
- 4) 必要な観測技術を自ら提案あるいは開発すること。(土木分野から見た必要な気象観測技術の開発)
- 5) 3)、4)を1)、2)にフィードバックすること。

も土木分野において極めて重要である。

## 7. おわりに

気象レーダーにより時間的・空間的によりきめ細かであり高精度に降雨や風の観測が可能となってきた。このきめ細かさの向上はまだまだ進展している。ここ

ではゲリラ豪雨の早期探知や予測を例示したが、「はじめに」でも述べたように、突風や竜巻の監視にも利用できる潜在能力を高く持っている。鉄道の安全運行にますます活用されるいろいろな技術が生まれることを期待したい。

## 参考文献

- 1) 中北英一・矢神卓也・池淵周一：1998那須集中豪雨の生起・伝播特性，水工学論文集，第44巻，pp.109-114，2000.
- 2) 五道仁美・内藤正彦・土屋修一：Kdp-R関係式の適用範囲拡張によるXバンドMPレーダの観測精度の向上，土木学会論文集，B1(水工学)，Vol.70，No.4，pp.505-510，2014.
- 3) <http://www.river.go.jp/x/xmn0107010.php>
- 4) 中北英一・山邊洋之・山口弘誠：ゲリラ豪雨の早期探知に関する研究，水工学論文集，第54巻，pp.343-348，2010.
- 5) 中北英一・西脇隆太・山邊洋之・山口弘誠：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)，Vol.69，No.4，pp.325-330，2013.
- 6) 中北英一・西脇隆太・山口弘誠：ゲリラ豪雨の早期探知・予報システムの開発，河川技術論文集，Vol.20，pp.355-360，2014.
- 7) 片山勝之・山路昭彦・中村文彦・森田宏・中北英一：局地的豪雨探知システムの開発，河川技術論文集，Vol.21，pp.401-406，2015.
- 8) 増田有俊・中北英一：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)，Vol.70，No.4，pp.493-498，2014.
- 9) 高田 望・田中裕介・池淵周一・中北英一：局地的な大雨の予測精度向上を目指した降水ナウキャスト手法の開発，土木学会論文集，B1(水工学)，Vol.69，No.4，pp.349-354，2013.
- 10) 椎葉充晴，高棹琢馬，中北英一，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.349-354，1984.
- 11) 鈴木博人・大島竜二・中北英一・高橋日出男，雨量計による大雨の捕捉性能の評価と雨量計の受持ち区間の見直し方法に関する研究，土木学会論文集，B1(水工学)，第71巻，pp.1303-1308，2015.
- 12) 渡邊美徳，大島竜二，鈴木博人：レーダー雨量の列車運転規制への活用に関する研究，JR EAST Technical Review-No.56，pp.7-10，2017.
- 13) 渡邊美徳，鈴木博人，増田有俊，中北英一：鉄道における降雨量予測情報の利活用に関する研究，第23回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2016)，pp.175-178，2016.
- 14) Watanabe, Yoshinori, Hiroto Suzuki, Aritoshi Masuda and Eiichi Nakakita: Study on utilization of rainfall prediction information in railway, Weather Radar and Hydrology proceeding, p.101, 2017.
- 15) 中北英一・山口弘誠・隅田康彦・竹畑栄伸・鈴木賢士・中川勝広・大石哲・出世ゆかり・坪木和久・大東忠保：偏波レーダーとビデオゾンデの同期観測および降水粒子タイプ判別，土木学会水工学論文集，第53巻，pp.361-366，2009.
- 16) 増田有俊・中北英一，Xバンド偏波レーダを用いた発達する降水セルの検出に関する研究，土木学会論文集，B1(水工学)，第72巻，pp.193-198，2016.