

## 報告書概要

<b>技術研究開発課題名</b>	XバンドMPレーダ等の観測情報の活用に関する技術開発
<b>技術研究開発テーマ名</b>	XバンドMPレーダの効果的実利用へ向けての降雨観測・予測とCバンドレーダとの連携活用に関する技術研究開発
<b>研究代表者</b>	
氏名	所属・役職
深見 和彦	(独) 土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター (ICHARM) 水災害研究グループ 上席研究員
<b>共同研究者</b>	
氏名	所属・役職
牛山 朋来	(独) 土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター (ICHARM) 水災害研究グループ 専門研究員
佐山 敬洋	同 研究員
萬矢 敦啓	同 研究員
廣江 亜紀子	同 研究員 (2011年4月～)
菅野 裕也	同 研究員 (～2011年3月)
<b>【1】背景・課題</b>	
<p>XバンドMPレーダの高いポテンシャルを最大限生かし切るためにいくつか未解明の本質的な技術的課題が残されている。第1にレーダメッシュスケールでのレーダ雨量の観測精度が未解明、第2に洪水予測の確保精度の観点からレーダ観測に求められる精度が未解明、第3に短時間急激増水に対応するための効果的で迅速対応可能な降雨予測技術が未確立、第4にXバンドMPレーダとCバンドレーダ雨量計の最適な連携活用手法が未確立、といった点である。</p>	
<b>【2】技術研究開発の目的</b>	
<p>XバンドMPレーダ(X-MPレーダ)の利活用と将来のCバンドレーダ雨量計との連携利用に係る基本的課題を克服する知見の蓄積を行い、我が国のレーダ雨量計インフラを最も効果的に活用できる観測・運用手法の提案に資する総合的な成果を得ることを目的として、以下の4課題を設定した。</p>	
<b>(1) 密に設置された地上雨量計によるレーダメッシュスケールでのレーダ雨量の定量評価</b>	
<p>レーダメッシュスケールでの降雨特性を地上での密に配置された雨量観測から把握し、X-MPレーダによる降雨観測精度の関係を明らかにする。</p>	
<b>(2) 洪水予測の観点からレーダに求められる計測精度の解明</b>	
<p>レーダ雨量の誤差特性を定量的に解明するとともに、それが洪水予測(流出解析)に伝播する影響について感度分析を行う。その成果をもとに、必要な水位予測精度を確保する観点から、X-MPレーダに要求される計測精度を考察する。</p>	
<b>(3) 局地的豪雨早期予測を行うための高速降雨予測モデルの開発</b>	
<p>1～3時間程度のリードタイムで降雨の発達・減衰を、定性的(数段階レベル)にでも高い信頼性で5分程度以内に迅速に予測する手法を開発する。</p>	
<b>(4) XバンドMPデータを活用したCバンドレーダ広域雨量評価精度改善手法の開発</b>	
<p>X-MPレーダデータを活用してCバンドレーダ雨量計の最適定数(B<math>\beta</math>)を推定し精度を改善する手法を開発する。また、その手法を活用することで、広域での雨量観測精度改善を図ることのできるX-MPレーダとCバンドレーダの合成雨量プロダクト作成手法を提案する。</p>	

### 【3】技術研究開発の内容・成果

#### (1) 密に設置された地上雨量計によるレーダメッシュスケールでのレーダ雨量の定量評価

##### 1) レーダ雨量観測メッシュスケールでの地上雨量計の高密度配置

土木研究所敷地（レーダサイトより約46km）のレーダメッシュスケール（1km×150m×2メッシュ）に相当するエリアに25台の転倒雨量計を2010年3月に設置し（図-1）、約3年間にわたる断続的な降雨観測データを収集した（表-1）。但し、データ記録間隔は2011年3月までは10分、2011年4月以降より1分である。

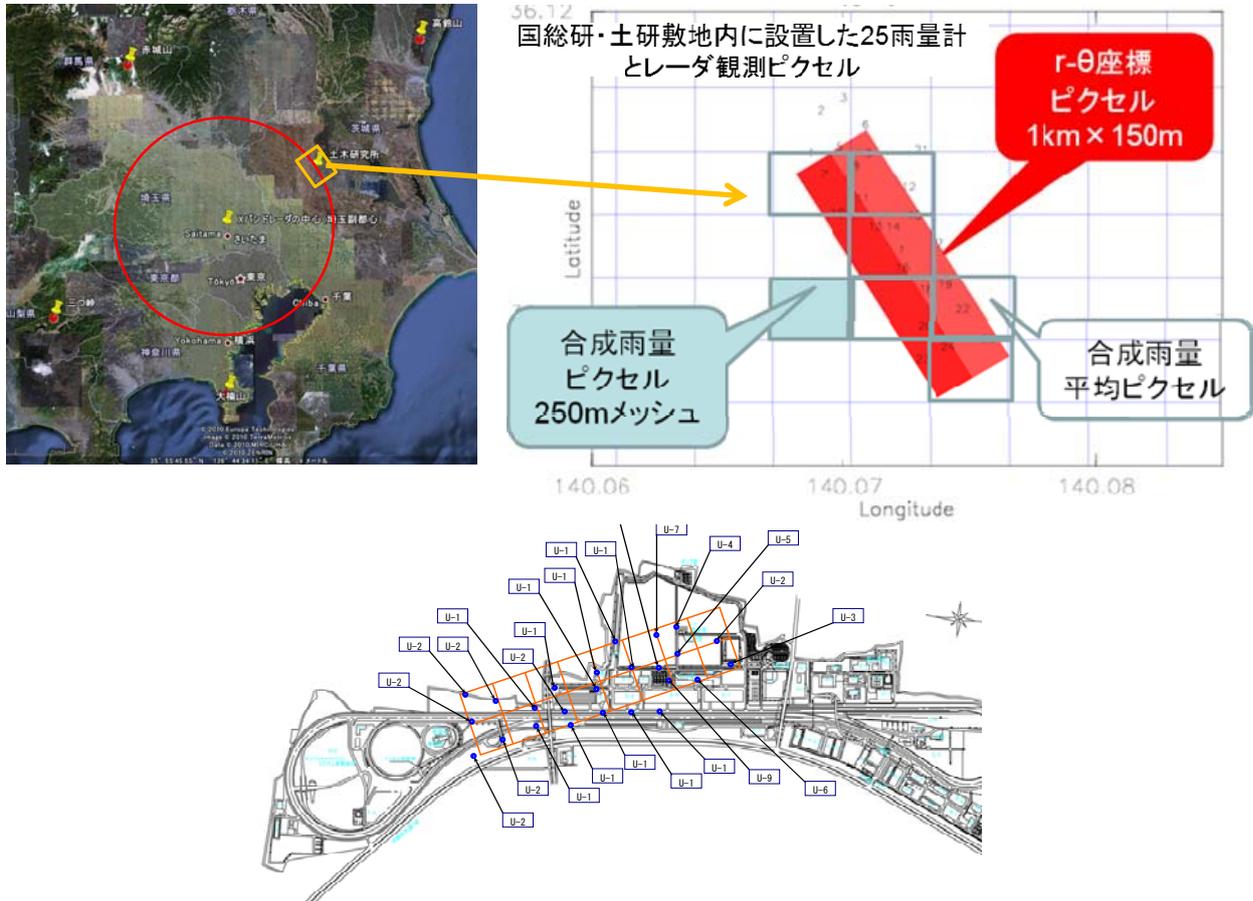


図-1 雨量観測機器配置図

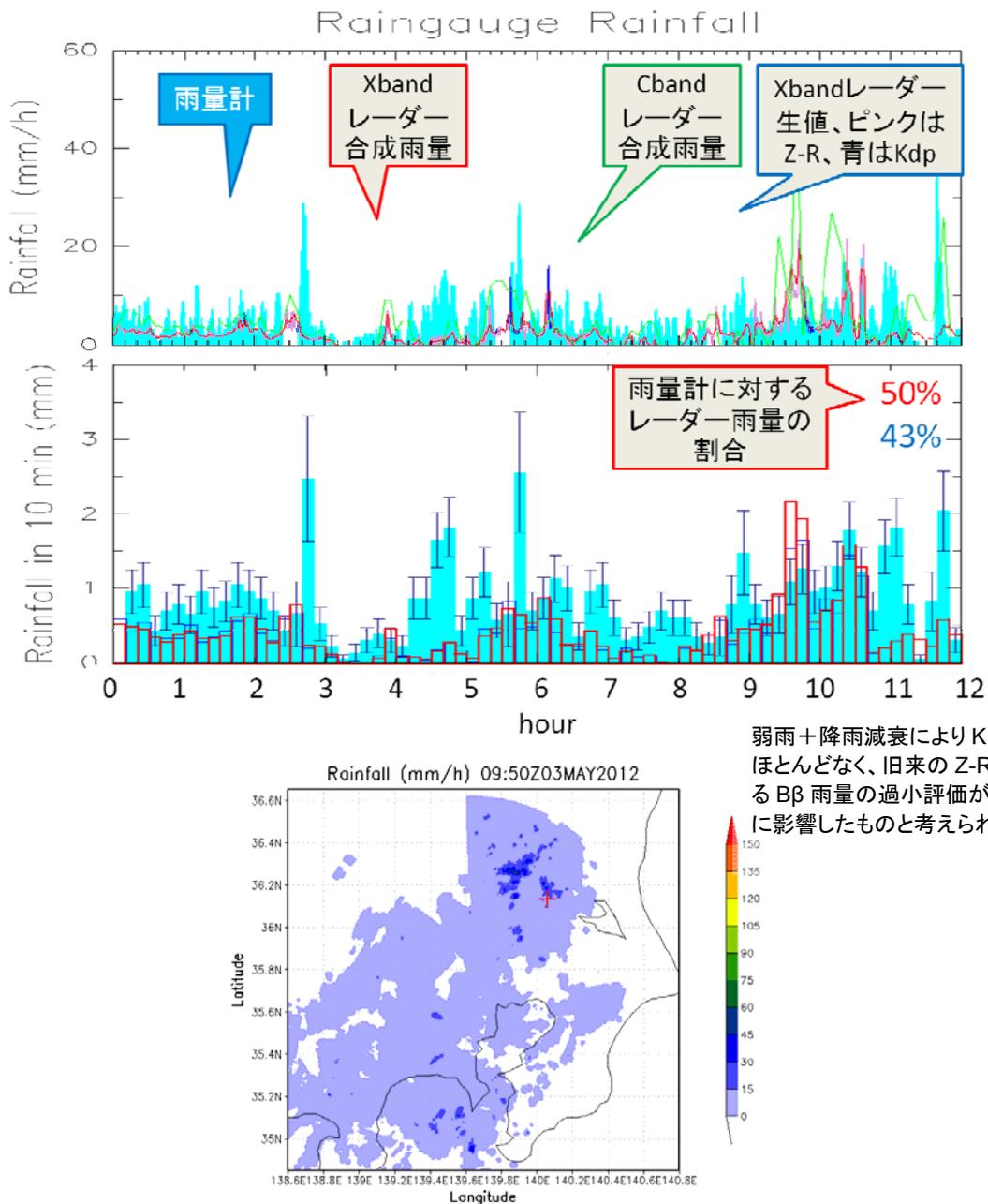
##### 2) 解析結果

紙面の都合上ここでは代表的な事例のみを示す。図-2は2012年5月3日0～12時の事例である。低気圧の通過に伴い、多くの降水セルが観測地点上空を通過した事例である。上図の1分毎の時系列では、Xバンドレーダ合成前雨量（r-θ座標ピクセル値を平均）と合成雨量（250mメッシュ値を平均）は良い一致を示しているものの、それらと転倒雨量計の対応はほとんどの時間帯で悪く、レーダは過小評価となっている。しかし、10時台についてはレーダと転倒雨量計の時系列は良い対応を見せている。Xバンドレーダ合成前雨量を見てみると、ほとんどの時間帯でピンク色であり、XバンドMPレーダの特長が活かせる新しいKDP法による雨量ではなく、旧来型のZ-R関係によるBβ法から計算した雨量であることを示している。従って、レーダによる降水強度推定精度が悪かったものと考えられ、結果として転倒雨量計との対応が悪かったものと考えられる。

次に、図-2の中図は、10分雨量に換算した雨量計平均値、Xバンドレーダ合成前、および合成雨量の変動である。ここでもレーダによる合成前および合成雨量が過小評価傾向を示している。棒グラフの頂点付近のバーによって示された雨量計の値のばらつきの標準偏差に注目すると、ほとんどの期間でレーダ推定雨量は雨量計の値のばらつきの範囲から外れている。図内に表示された雨量計に対するXバンドレーダによる積算雨量の割合は、合成雨量が50%、合成前雨量が43%であり、両者とも過小評価であった。

図-2の下図は、Xバンドレーダから得られた最盛期の降水強度（合成雨量）の水平分布である。プ

ラス印が雨量計の位置を示す。いくつかの降水セルが通過した事例であることが示唆される。



弱雨+降雨減衰によりKDP雨量はほとんどなく、旧来のZ-R関係による $B\beta$ 雨量の過小評価が総雨量比に影響したものと考えられる。

図-2 2012年5月3日の降水強度(上)と10分雨量の変動(中)、降水強度の水平分布(下)。上図の水色陰影: 1分毎の高密度地上雨量計の平均値、赤線: Xバンドレーダ合成雨量、緑線: Cバンドレーダ合成雨量、紫と青線: Xバンドレーダの合成前( $r\theta$ 座標生値の平均)の値であり、青がKDP法から、紫が $B\beta$ 法から計算された値である。中図は、水色棒グラフが10分毎に変換した22台の雨量計平均値、棒グラフの頂点の上下のバーは雨量計の値の標準偏差を表わす。赤、青がそれぞれ10分毎に変換したXバンドレーダ合成雨量と合成前の雨量。図内右上に、この降水事例の雨量計に対するレーダ合成雨量と合成前の雨量の割合を示す。下図の+は雨量計の位置を示す。

図-3は2012年9月2日の事例である。この事例は、雷雨性の局地的集中豪雨であり、降水のピークの4時台後半には約100mm/hの降水強度を観測した。レーダと地上雨量計の対応は、このピーク雨量より前で悪く、後で良くなっており、これは、ピーク雨量前ではZ-R関係から導出したレーダ雨量の割合が多いこと、さらにピーク雨量を観測した降水システムがレーダと観測点の間にあったため降雨減衰の影響が変化したこと、などが原因と考えられる。降水システムは東に進むものが多く、観測点はレーダの東北東に位置していることから、強い降水システムがある時には観測点上空を通過す

る前の方が降雨減衰の影響が大きくなるからである。地上雨量計に対する合成雨量と合成前雨量の割合は、それぞれ 77%と 72%であった。

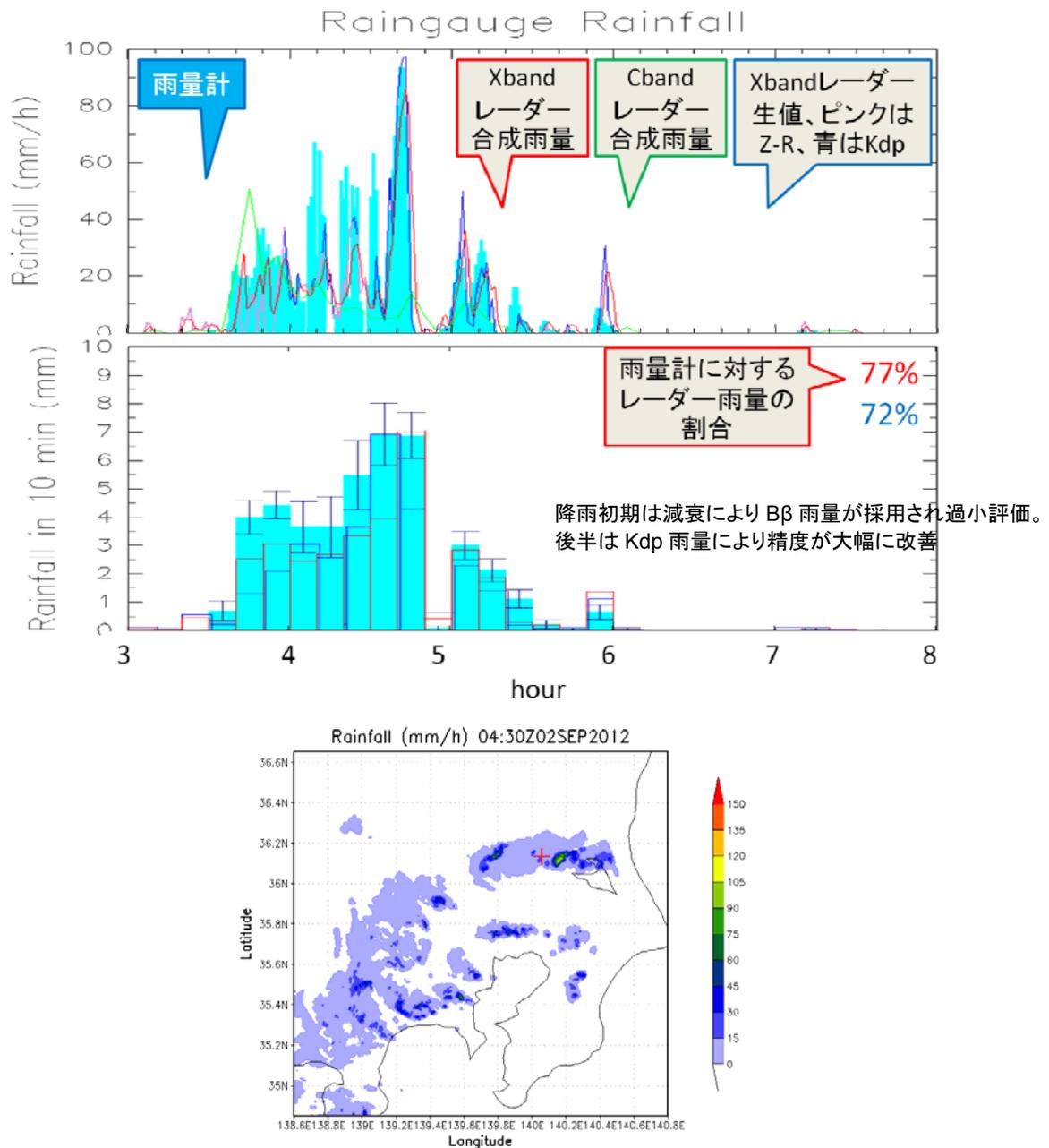


図-3 2012年9月2日の降水強度と10分雨量の変動、および降水強度の水平分布

2010～2012年の結果をまとめて表-1に示す。2010年の結果は、合成雨量の転倒桁雨量計に対する割合が豪雨事例でも50%を割るなど、全体的に低かった。これは、Z-R関係の係数が全国一律のものを使っていたため誤差が大きかったことも原因として考えられる。平成23年度以降は各レーダごとのZ-R関係の係数を用いるように変更されたため、弱い雨が続く事例を除いて割合が70%前後となり、全体として精度が向上している。

一方、2011年は合成雨量よりも合成前雨量の方が雨量計に対する割合が高かったが、平成24年度は逆に合成雨量の方が合成前雨量よりも割合が高くなった。これについては、理由は明らかではないが、ひとつ考えられるのは、合成前雨量は観測ピクセルの平均化を行っていないために降雨減衰で失われた情報がある場合に影響がより大きく出てしまったのではないかと考えられる。

表-1では、高密度地上雨量観測により得られたレーダメッシュスケールにおける降雨のばらつき(標準偏差)も併せて示した。台風のような強風時に地上雨量のばらつきが大きくなるケースが多か

表-1 2011～2012年の解析事例の総降水量、合成雨量と合成前雨量の積算値の高密度地上観測雨量に対する比（黄色部分は強風事例を示す）

	解析事例	特徴	総雨量 (転倒枡)	合成雨量 /雨量計	合成前雨量 /雨量計	ばらつきの 標準偏差	風速
2010年	7月9日	梅雨前線	19mm	43%	49%	21%	2～3m/s
	7月25日	雷雨性	21mm	67%	106%	23%	4～5m/s
	9月8日	台風12号	59mm	45%	67%	21%	2～3m/s
	9月16日	低気圧	74mm	39%	59%	21%	2～3m/s
	9月26日	層状性	115mm	21%	41%	30%	1～2m/s
2011年	7月1日	雷雨性	35mm	79%	90%	39%	5m/s
	7月19日	台風6号	38mm	85%	95%	39%	5m/s
	8月19日	梅雨前線	56mm	76%	80%	37%	2～4m/s
	9月21日	台風15号	138mm	69%	72%	37%	4～19m/s
	10月5日	秋雨前線	60mm	37%	41%	37%	2～4m/s
	2012年	5月3日	低気圧	58mm	50%	43%	21%
6月19日		台風4号	59mm	69%	64%	26%	5～8m/s
9月2日		雷雨性	41mm	77%	72%	21%	2m/s
9月22日		雷雨性	23mm	71%	58%	23%	2m/s

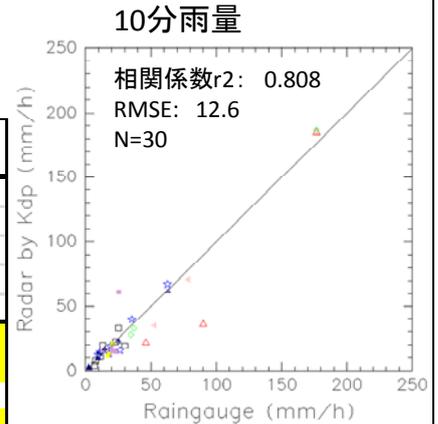


図-4 Kdp法によるX-MPレーダ雨量と高密度地上観測雨量との関係

ったが、レーダ雨量と地上雨量との差異との関係はさほど明確ではない。レーダ雨量と地上雨量との対応性は、地上雨量空間分布のばらつきよりも、今回の観測期間中にも大きく変化していたレーダ観測条件（KDP法 or  $B\beta$ 法、降雨減衰条件等）に、より大きく直接的に影響を受けているように見受けられた。なお、上表の解析結果には、高精度が期待されるKDP法によるレーダ雨量評価値だけでなく、旧来型のZ-R関係（ $B\beta$ 式）に基づくレーダ雨量評価値も含んでおり、むしろ後者の影響が支配的であることは先述の通りである。このため、KDP法により評価されたレーダ雨量のみを抽出し、高密度地上雨量観測値との比較をおこなったのが図-4である。この図より、高密度地上雨量観測サイトはレーダサイトから46kmとXバンドレーダとしては遠隔の地点であるにもかかわらず、少なくともKDP法によるレーダ雨量については、地上雨量と非常に良い一致をみせている点を確認することができた。

## (2) 洪水予測の観点からレーダに求められる計測精度の解明

レーダ観測による不確実性を統計的・客観的に評価・抽出する手法およびそのランダムな誤差特性を反映した降雨場の生成手法を開発し、分布型流出モデルを介して流出解析に及ぼす影響を定量的に評価した。

### 1) レーダ雨量と地上雨量の比較による誤差特性の統計解析<sup>1)</sup>

#### ①統計モデル

本研究では、地上雨量を真値とみなしたうえで、レーダ雨量の関数である決定論的成分 $h(R_r)$ とランダム誤差成分 $e(R_r)$ との積で地上雨量を表現できるものとし式(1)のようにモデル化した。

$$R_g = h(R_r) \cdot e(R_r) \quad (1)$$

ここに、 $R_g$ は地上雨量であり $R_r$ は地上雨量に対応する地点・時刻のレーダ雨量である。

#### ②使用データ

2010年7月から2012年9月までを対象に、XバンドMPレーダ雨量データおよびCバンドレーダ雨量データを収集した。収集したデータの概要を表-2に示す。全国合成版のCバンドレーダ雨量は、全国26基の個々のレーダ雨量計の観測特性や機器性能の違いによる観測値の差を合理的に修正するために、地上雨量計のデータ等を用いて均質化補正を行い、連続的・定量的な合成処理を行っている。また、定量的精度を高めるために、3次メッシュ毎に周辺の地上雨量計を用いたキャリブレーション（メッシュ補正）を行っている。

統計解析を行うにあたり、地上雨量観測地点直上メッシュのXバンド・Cバンドレーダ雨量を10分・60分雨量強度(mm/h)のそれぞれの時間分解能に変換したデータセットを作成した。また、XバンドMPレーダ雨量の使用においては、品質管理情報を参考として降雨減衰が発生した時間帯の雨量データは除外した。

Xバンドはレーダサイトからの距離により精度が変わるため、統計解析では最寄りのレーダサイト

からの距離 20km 毎に Zone1~4 を設定し、データセットを分類した。C バンドについては地上雨量計による均質化補正やメッシュ補正が行われており、レーダサイトからの距離ごとによる観測特性の大きな違いは見られなかったため、Zone 分割は行わなかった。

表-2 収集対象データ

データ種別	時空間分解能		種別	備考
X バンド MP レーダデータ	1 分	250m	合成データ (直交座標)	近畿地方合成雨量強度データ
C バンドレーダデータ	5 分	1000m	合成データ (直交座標)	全国合成雨量強度データ
地上雨量データ	10 分	—	アメダス 10 分雨量 アメダス 60 分雨量	気象観測月報から収集

### ③誤差モデルの構築

誤差の分析にあたっては、まず決定論的成分を評価し、次にランダム誤差成分を評価する。横軸のレーダ雨量を 0.1 mm/h 間隔でずらしながらバンド幅を決定し、その中に分布する地上雨量を積み付き平均している。

図-5 は、決定論的成分の分析結果である。レーダ雨量が 10 mm/h 以下の範囲では、X バンドの結果はゾーンに関わらずバイアスが小さいことが分かる。降雨強度がそれより大きい範囲では、いずれもプロットが 1 対 1 の直線よりも下側にあるのでレーダが地上雨量に比べて過大評価していることを示唆している。但し、レーダ雨量が 20 mm/h 以上となるような高降雨強度の範囲ではサンプル数が少なく、それが観測された場所・時刻の地上雨量が同じ降雨強度を示さない限り、この範囲のプロットは 1 対 1 の線よりも下側に分布する特性を持つので、この図の解釈には注意が必要である。

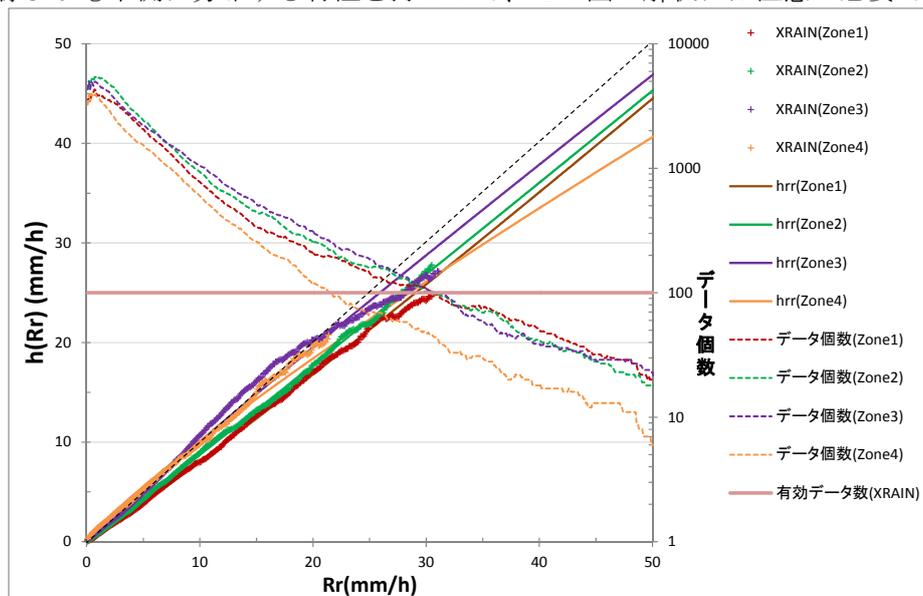


図-5 決定論的成分の分析結果(60分積算、Xバンド Zone 別)

本研究の方法ではある観測値から得られる決定論的成分を中心とし、ガウス分布に従う相対誤差をもつ真の値が分布していると仮定している。地上雨量を対応するレーダ雨量から求められる決定論的成分  $(h(Rr, j))$  で除した値にてランダム誤差成分  $e(Rr)$  を求め、同じレーダ雨量に対して  $e(Rr)$  の標準偏差を計算する。図-6 は  $Rr$  を横軸に、 $e(Rr)$  の標準偏差を縦軸にプロットした結果を示している。縦軸の標準偏差値  $\sigma_e(Rr)$  が小さいほど、レーダ雨量のばらつき (ランダム誤差) が小さく、かつ、地上雨量との偏差が小さいことを意味する。

図-6 の分析結果から、X バンドはゾーン毎に大きく結果が異なることが分かる。Zone 1、2 では C バンドに比べて  $\sigma_e(Rr)$  が小さくなっている ( $Rr$  が 10 mm/h 以内では概ね同じ値となる)。  $Rr$  が 10 mm/h 以上の高降雨強度の範囲では、C バンドは概ね  $\sigma_e(Rr)$  が 0.4 から 0.5 程度で推移するのに対し、X バンドは C バンドに比べて低く、0.3 から 0.4 程度にまで低減する。つまり、Zone 1 や Zone 2 では 10 mm/h 以上の高降雨強度を X バンドの方が C バンドよりも高精度で捉えていると考えることができる。また Zone 3 では X バンドと C バンドで同等になり、Zone 4 では C バンドの方が  $\sigma_e(Rr)$  が小さくなっている。

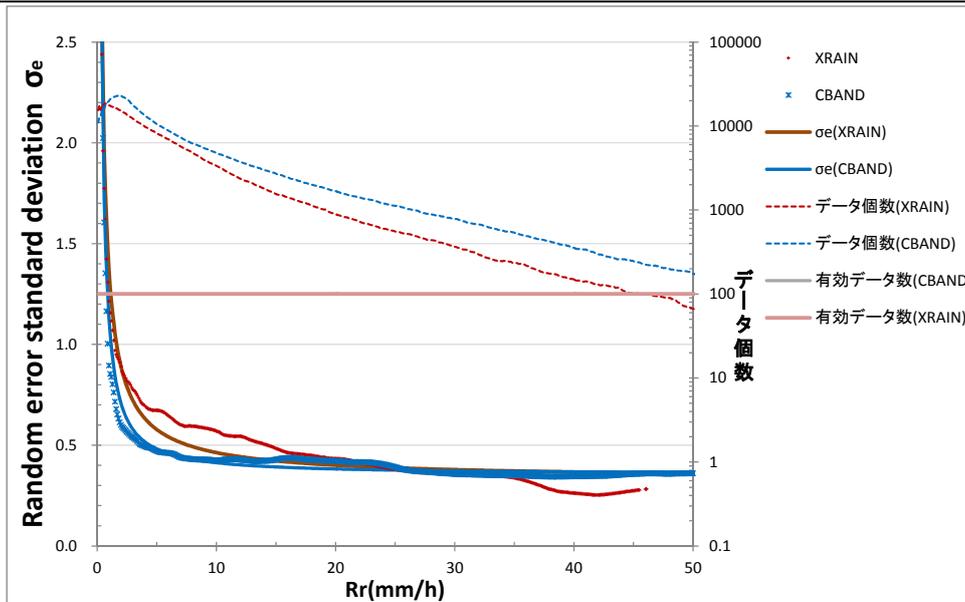


図-6(1) XバンドとCバンドの降雨強度別ランダム誤差成分の比較(60分積算、全期間)

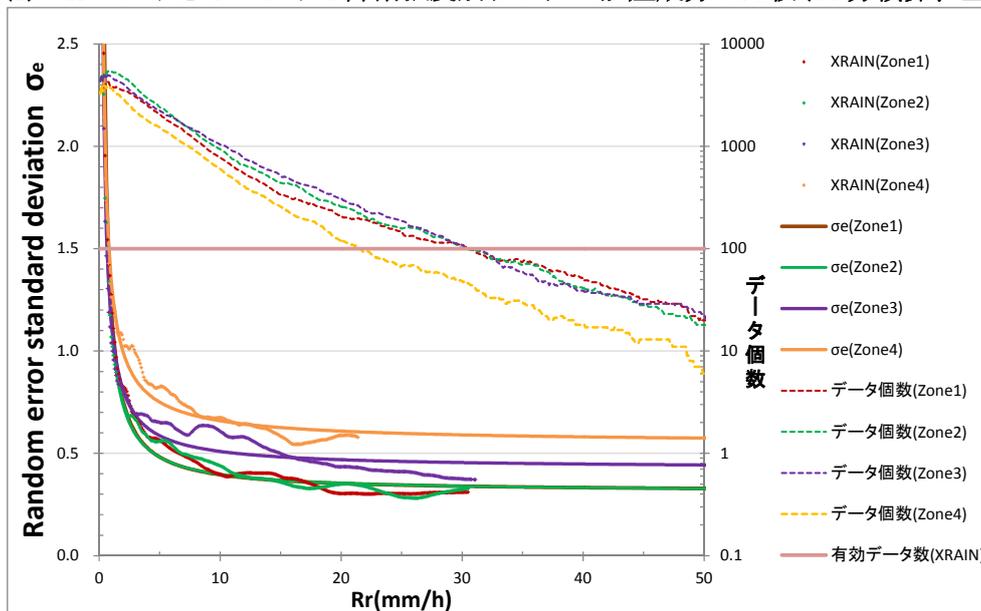


図-6(2) Xバンドレーダにおける降雨強度の関数としてのランダム誤差成分の連続関数同定(60分積算、全期間)

ランダム誤差成分がもつ(同時刻での)空間相関をプロット・定式化した結果を図-7に示す(Xバンドで橙色プロット・線、Cバンドで青色プロット・線)。距離が近いほど相関係数が高く40 km以内で概ね0.6以上の空間相関係数を示すことが分かる。またXバンドの方がCバンドに比べて誤差の空間相関が高いことも確認できる。これは今回の分析に用いたCバンドのデータが、地上雨量などを用いて補正した後のデータであり、レーダ雨量で観測されるべき本来の降雨の空間相関特性が乱されていることに起因している可能性もある。一方、後述する時間相関(自己相関)を考慮した確率降雨場の生成において、タイムラグ1(図-7では60分)の空間相関係数の値が必要となるため、タイムラグ1だけ前のランダム誤差成分との空間相関係数についても図-7にプロットした(Xバンドで黄緑色プロット・ピンク色線、Cバンドで黄色プロット・紫線)。自己相関は全体として低下していることが確認できる。また、後述する行列式展開を簡単にするための工夫として、タイムラグ1においても、同一メッシュにおいては相関係数1.0を仮定した定式化も行っている(Xバンドでピンク色線、Cバンドで水色線)。

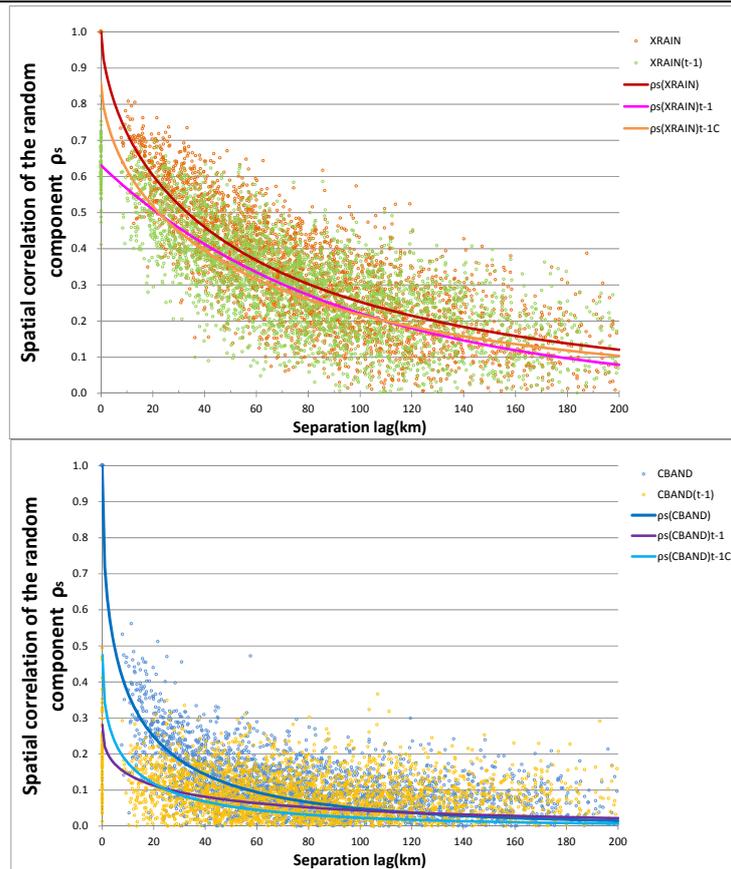


図-7 ランダム誤差成分の空間相関係数：  
 全域：60分雨量（上）Xバンド、（下）Cバンド

## 2) 誤差の統計的特性を反映した確率降雨場の生成<sup>2)</sup>

誤差（レーダ雨量値の時空間的なばらつき）の統計モデルを用いて、誤差を考慮した確率降雨場の生成を行った。基本的には、誤差のランダム誤差成分について、時空間相関を指数式で表現し、かつ、空間相関行列を作成することを通して、時空間相関特性を保持した確率場の生成を行い、決定論的成分に掛け合わせることによって生成を実現する。

本研究では2011年の台風12号と台風15号時の千種川流域（流域面積730km<sup>2</sup>）を対象に、誤差（レーダ雨量値の時空間的なばらつき）を考慮した降雨場生成の事例研究を行った。

1kmメッシュのXバンド60分雨量について以下の方法で生成した。

- ・タイプA（自己（時間）相関  $\mathbf{M}_1 = \mathbf{C}\mathbf{M}_0$ ：図-7上の赤・橙線式を採用、誤差成分の分散は空間的に非一様とし、③で同定した降雨強度の関数で与える。）
- ・タイプB（自己相関  $\mathbf{A} = \mathbf{M}_1\mathbf{M}_0^{-1}$ ：図-7上の赤・ピンク色線式を採用、誤差成分の分散は降雨強度に関わらず一様）
- ・タイプC（自己相関  $\mathbf{A} = \mathbf{M}_1\mathbf{M}_0^{-1}$ ：図-7上の赤・ピンク色線式を採用、誤差成分の分散は空間的に非一様とし、③で同定した降雨強度の関数で与える。）
- ・タイプD（自己相関なし（時間相関を無視）、誤差成分の分散は空間的に非一様とし、③で同定した降雨強度の関数で与える。）

2011年9月3日のピーク時付近の10・11・12時の観測雨量  $R_r$ 、誤差特性を反映させた結果としてのレーダ雨量観測推定値  $R_a$  (Case=1)、および、そこでのレーダ雨量の確率誤差場  $e(R_r)$  の一例を図-8、9月3日の代表10ケースの流域平均雨量時系列を図-9に示す。

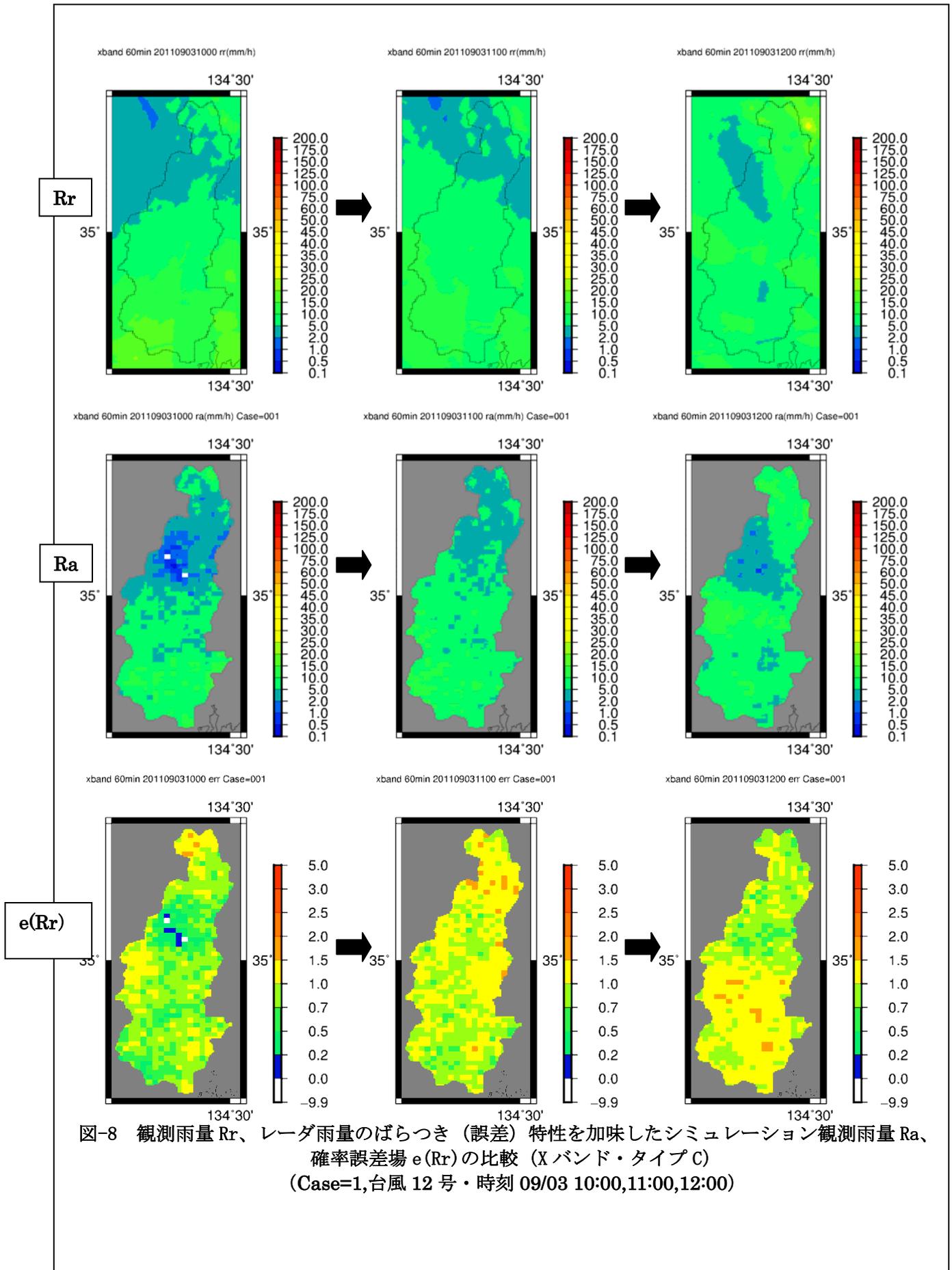


図-8 観測雨量  $R_r$ 、レーダ雨量のばらつき（誤差）特性を加味したシミュレーション観測雨量  $R_a$ 、確率誤差場  $e(R_r)$  の比較 (Xバンド・タイプC)  
(Case=1, 台風 12 号・時刻 09/03 10:00, 11:00, 12:00)

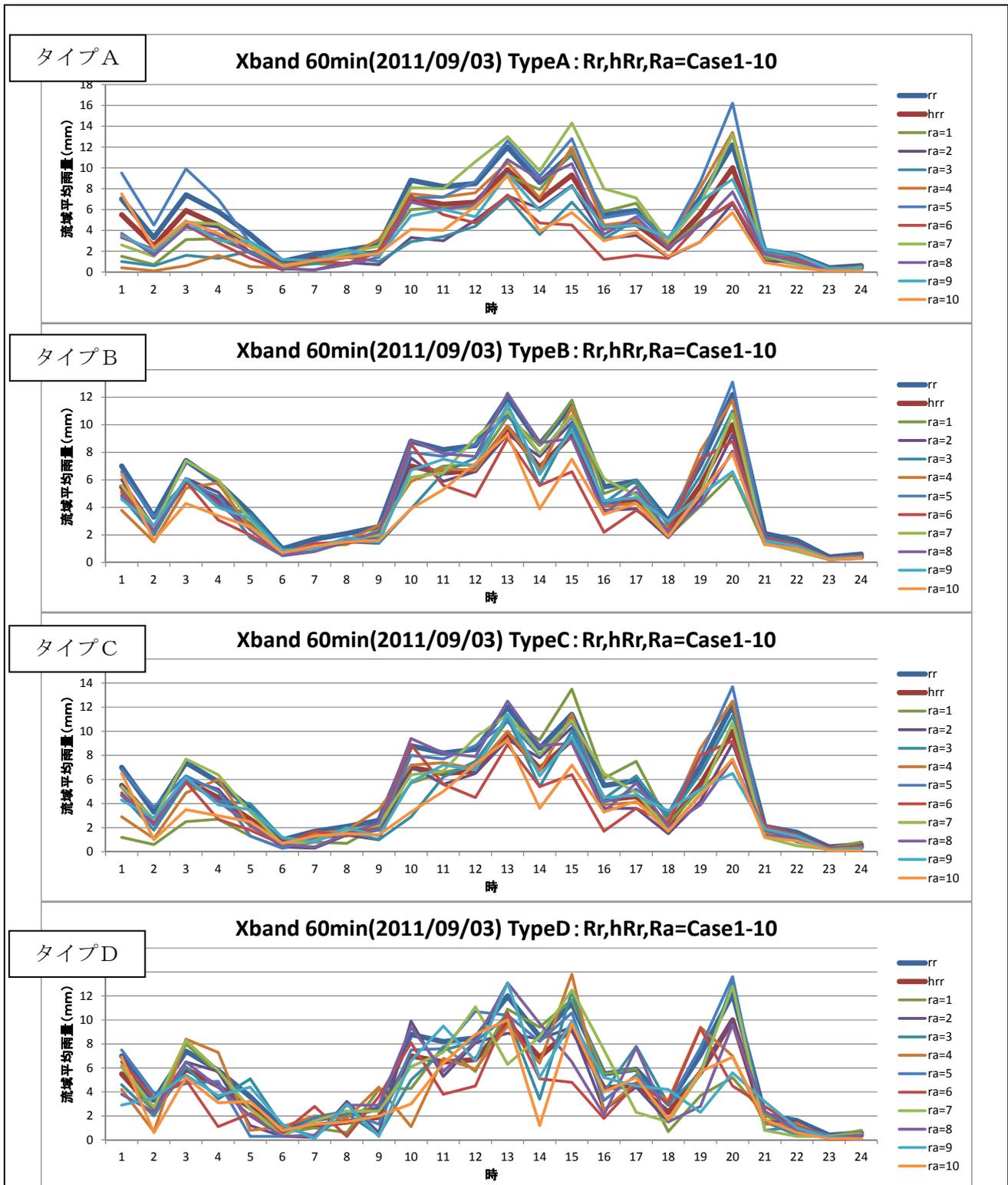


図-9 Rr、hRr と生成した Ra×10 ケースの時系列比較 (Xバンド・09/03)

自己相関を考慮しない場合(タイプ D)は、各サンプルの降雨量が、決定論的成分の流域平均雨量の周りにランダムに出現するのに対し、自己相関を考慮した場合(タイプ B、C)は過大・過小が時間的に連続して出現する。すなわち、ある地点に着目しレーダ雨量が地上雨量に比べて過大・過小評価をしている場合、次の時間ステップでも同様の傾向を示す。タイムラグ 1 の空間相関係数を簡易的に求めたタイプ A は、距離の短い領域において空間相関を高く想定しすぎているためか、降雨イベント中の誤差傾向が長時間持続している。その結果、設定したランダム誤差の標準偏差値と生成結果との乖

離が大きく、適切に降雨場の統計的性質を再現できていないことがわかった。以上のことから、以下では、タイプ A を除外して検討を進めた。

### 3) 確率降雨場を入力した流出計算と統計解析<sup>2)</sup>

#### ①セル分布型流出モデルによる流出計算

タイプ B,C,D の3つの手法により上記検討で生成した全ての降雨場(1 降雨事例につき 100 パターンの雨、60 分雨量値)をセル分布型流出モデル<sup>3)</sup>に入力し、流出計算を実行した。分布型モデルの空間解像度は 250 m とした。流出計算結果の一例(タイプ B)を図-10 に示す。

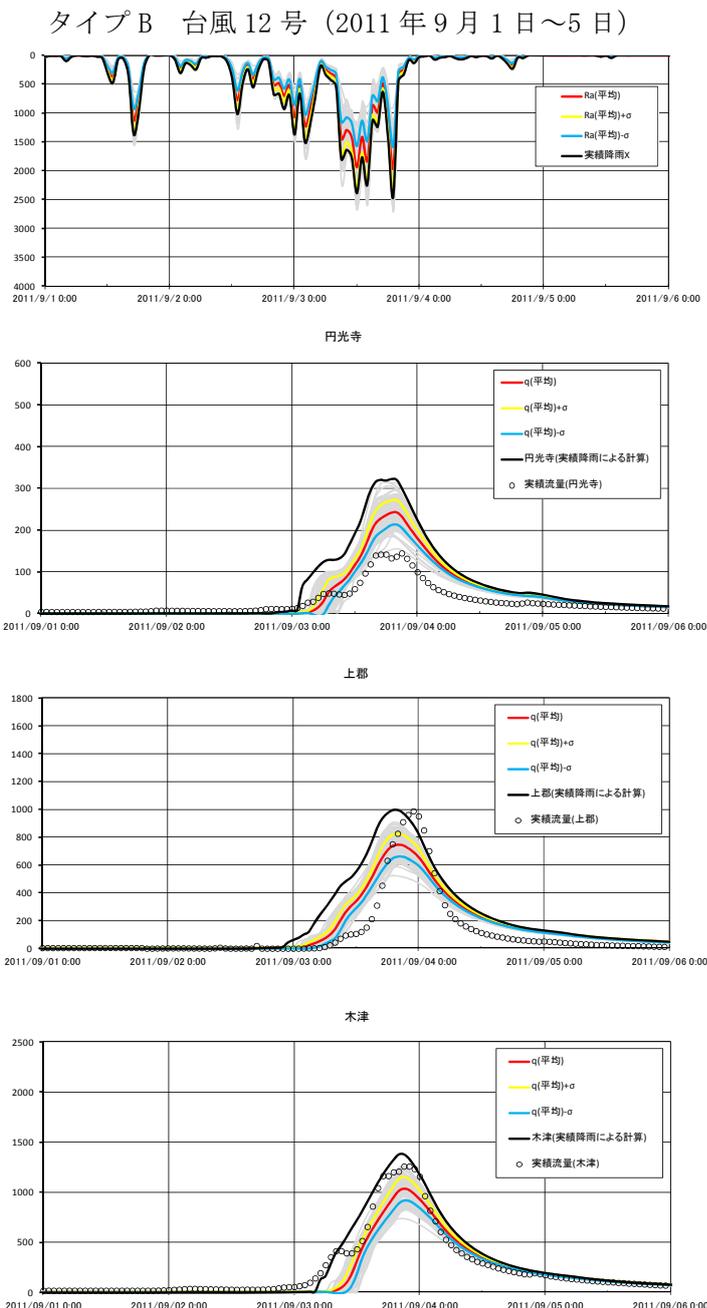


図-10 流出解析結果[単位  $\text{m}^3/\text{s}$ ]

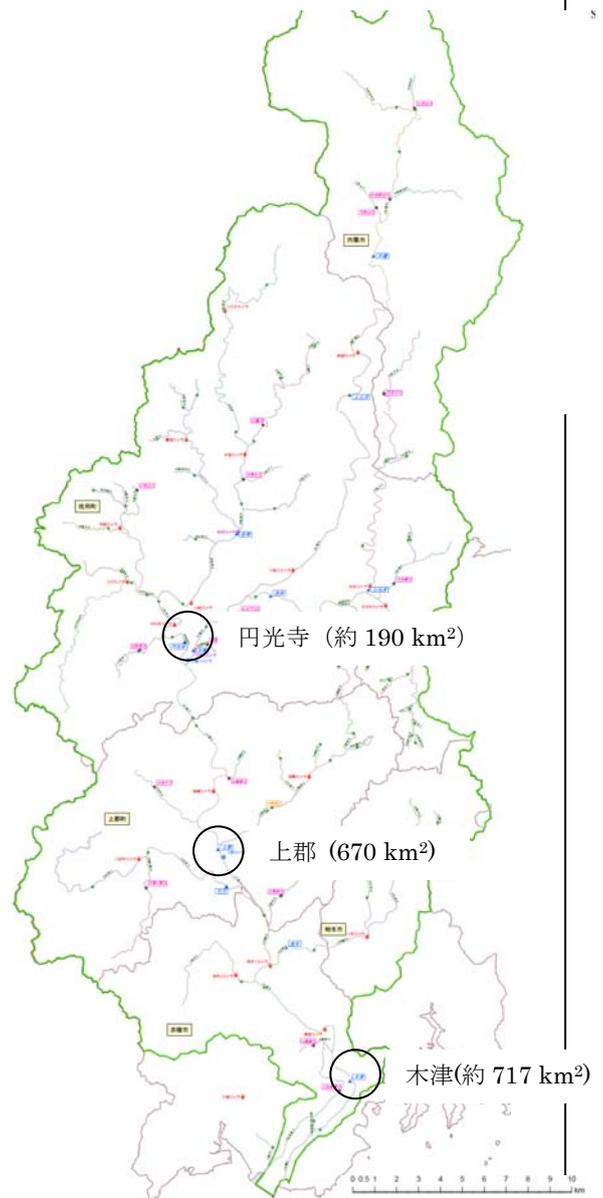


図-11 千種川流域と流量観測所位置

本概要では図は省略するが、自己相関を考慮しないタイプ D では、時間ステップ毎にランダム誤差が独立して生成されるため、降雨のばらつきを流出過程で打ち消し合い、結果として流出量のばらつきが小さくなった。一方、レーダ雨量の誤差特性を最も厳密にモデル化しているのはタイプ C であり、

それとタイプBを比較すると、タイプBの方がタイプCよりも流出量のばらつきが若干小さくなっていた。これは、タイプBでは、ランダム誤差について強い降雨時とほぼ同等の一定値を設定しているため、本来レーダ雨量のランダム誤差が大きくなる弱い降雨においても、誤差を小さく設定していることに原因があると考えられる。しかしながら、豪雨時の洪水流出を議論するときにはその影響は軽微であり、またランダム誤差を一定と仮定した方が分析や結果の解釈が容易であることから、以下ではタイプBの方法を用いて、レーダ雨量のランダム誤差を様々に変化させて感度分析を行った。

②ランダム誤差成分 $\sigma_e$ と洪水予測に係わる各種指標のばらつきの関係

上記の考察をもとに、タイプBの手法によりレーダ雨量の誤差特性を考慮した降雨場の生成をそれぞれ行い、その降雨群を入力した流出計算群から流出計算への誤差伝播特性を分析することで、洪水予測の観点から見たレーダ雨量計測に求められる精度を評価することを試みる。すなわち、ランダム誤差成分の標準偏差( $\sigma_e$ )を一定と仮定し、その $\sigma_e$ を0.1から0.5にまで0.1刻みで変更しながら降雨場を生成し、流出計算結果への影響について分析を行った。図-12は上中下流地点でのピーク水位の観点から、図-13は氾濫開始予測時刻のそれぞれの観点から、それらの変動係数もしくは標準偏差への影響をプロットした、Xバンドレーダデータでの解析事例である。

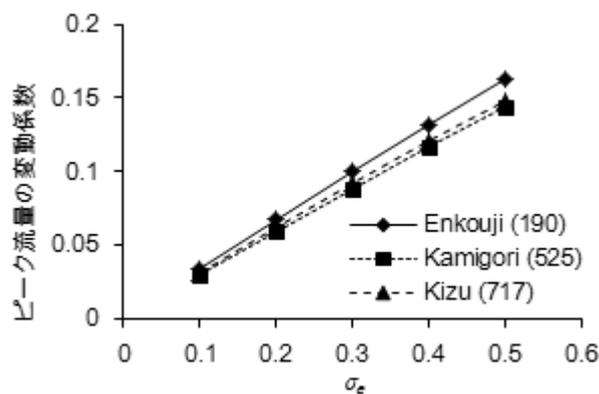


図-12 ランダム誤差成分の標準偏差 $\sigma_e(R_r)$ と流域3地点における計算ピーク流量の変動係数との関係(括弧内は集水面積[ $\text{km}^2$ ])

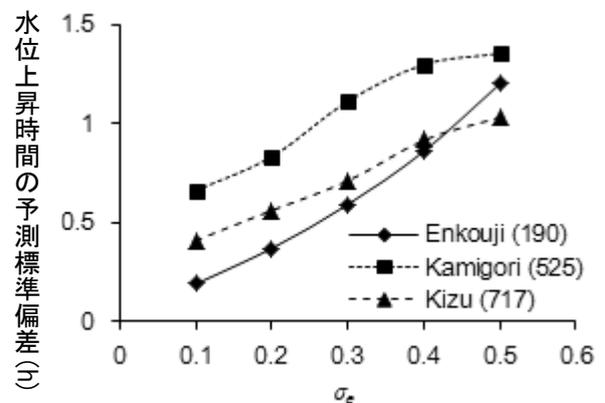


図-13 ランダム誤差成分の標準偏差 $\sigma_e(R_r)$ と流域3地点における水位上昇時間の予測標準偏差との関係(括弧内は集水面積[ $\text{km}^2$ ])

図-12より、流域面積の小さく変動係数が大きい円光寺地点(約190  $\text{km}^2$ )で、許容する流量予測の変動係数を0.15と仮定すれば、降雨側のランダム成分の標準偏差で0.4以下が必要であることがわかる。③で議論したように、Xバンドレーダのランダム誤差成分の標準偏差はZone 1から2において0.3から0.4程度で推移しており、その程度の降雨推定精度が確保されれば、上記の許容誤差範囲を満たす。次に水位の上昇速度の予測精度に着目する。水防団待機水位を基準に考えた場合、氾濫危険水位(上郡地点については避難判断水位)まで約1mの猶予がある。観測水位が水防団待機水位を超えた時刻を起点時刻とし、その時刻の水位から1m上昇するのに要する時間を水位上昇時間としたとき、例えば上郡地点では現実には約4時間であったのに対し、予測計算では、図-13より $\sigma_e$ が0.3から0.4程度の範囲に収まっている場合には、水位上昇時間予測の誤差は±1.3時間程度の範囲に収まることが分かった。

もちろん、これらの知見はあくまで千種川流域での2011年台風12号の事例での結果であり、より一般的かつ汎用的な結論を導くためには、より多くのイベントや他の対象流域での検討が必要である。しかしながら、本研究で開発した手法により、レーダ雨量の誤差特性が洪水予測の誤差特性にどのように影響するかを客観的かつ定量的に議論することが可能であることを明らかにした。

### (3) 局地的豪雨早期予測を行うための高速降雨予測モデルの開発

近年頻発している局地的大雨（いわゆるゲリラ豪雨等）による水害を防止・軽減するためには、局地的大雨の元となる現象を迅速に把握し、かつ、その次の10分程度以内の短時間にその豪雨がどの程度発達するのかを確実に予測することが有効と考えられる。そこで、レーダデータから検知された実在する雨域を対象として短時間予測を行うこと、そして、定量的に精度の高い結果を算出することが主目的ではなく、実在する降水セルが次の5分間に、どの程度発達（あるいは減衰）するのかを確実に予測する手法の検討を試みた。ここで用いた情報は、XバンドMPレーダから得られる降雨分布状況、雨粒の種類、水蒸気の分布状況、風の収束状況に加えて、気象庁が配信している領域気象モデルによる実況・予測値=GPV(Grid Point Value)である。これらの情報を重ね合わせることで、簡便でありながら、高速かつ確実な降雨予測判断が可能であるかについて検討を行った。

すなわち、GPVを用いて地表面付近における水蒸気分布、風向風速値を用いて風の収束状況を調べ、その特徴的な位置（例えば水蒸気又は風の収束度の高い領域）においてレーダ雨量計により観測された雨域の発達・減衰について、水蒸気混合比との関係を調べた。そして、「水蒸気混合比が高い領域を降水セルが通過すると降水セルが発達し、水蒸気混合比が低い場所に降水セルが移動すると降水セルが減衰する」との仮説が成立するかについて検証した。2007年7月から2010年9月の間の関東地方における主要な28降雨に対して分析を行った結果、上記仮説が成立ケースは15ケースであった。一方、その仮説の関係が顕著に見られないケースは都市型集中豪雨、地形性降雨、小さい降水セル、台風のケースであった。特に本研究での主たる予測対象である都市型集中豪雨や地形性降雨については、現状のGPVデータの現状の5kmメッシュは粗すぎて、そのままでは降雨予測に不十分であることがわかった。

図-14は2010年7月5日19時40分における気象状況を示す。図の中央部に位置する降水域は東京都板橋区に内水被害をもたらしたものである。水蒸気の分布状況と降水域の位置を比較すると、降水域近傍における水蒸気量はそれほど大きくない。また図で用いているGPVによる風向風速から収束域を調べても同様に降水域との関連は見いだせない。その後、降水セルは増殖を続け、21時をすぎると徐々に減衰しその後は完全に消えた。東京都所管の板橋区板橋(35.8N, 139.7E)に位置する地上雨量計(1分毎)によると、18時33分から19時30分までに107mm、その後21時まで26mm、合計133mmの降雨を観測している。このような都市型豪雨の予測は、より細かい空間分解能を有するメソスケール気象モデルを用いてダウンスケールをする等により、更に詳細に解析する必要があるものと考えられる。<sup>4)</sup>

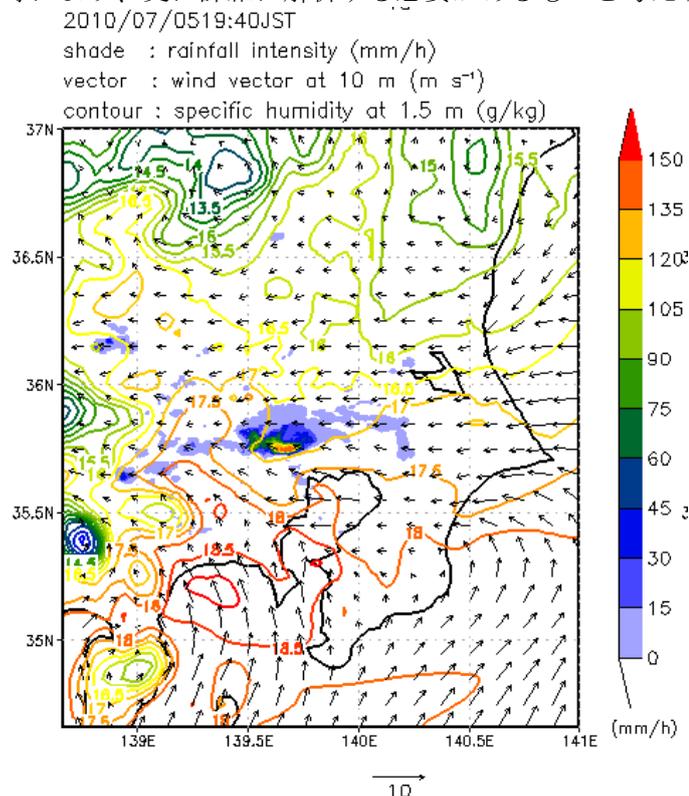


図-14 関東平野における気象状況(2010/7/5/19:40)

#### (4) XバンドMP データを活用したCバンドレーダ広域雨量評価精度改善手法の開発

本研究では、Cバンドレーダ雨量計の定量評価のために、XバンドMP レーダ雨量計のマルチパラメータ (MP) 情報を含めた観測データを活用することで、リアルタイムに最適な雨量換算する手法の開発・検証を試みた。

具体的には、表-3 に示す土研手法・山口手法・加藤手法の3手法を適用し、それらの結果を比較検討することにより、各手法の効果及び課題を明らかにした。

上記3手法のうち、土研手法と山口手法は、X-MP レーダから得られるマルチパラメータ情報から空中雨滴の粒径分布に関連する諸パラメータ情報を取得し、それをもとにレーダ反射因子 (Z 値) と Z-R 関係のパラメータ (B,  $\beta$ ) を直接推定する手法である。通常は、B,  $\beta$  について過去の降雨時における Z-R 関係から経験的に求めざるを得ないことから、B,  $\beta$  値を固定して雨量評価を行うことが一般的である。しかし実際には、Z-R 関係 (すなわち B,  $\beta$ ) は、降雨成因等の違いに起因した雨滴粒径分布の違いにも影響を受けるため、雨量 R のみの1価関数とはならない。Cバンドレーダでは、この要因による誤差を抑制するために、地上テレメータ雨量データを活用して、最終評価値としての雨量データについて、直接オンラインでの補正合成処理を行っている。ここで提案する土研手法および山口手法は、最終評価段階ではなく、誤差の原因となっている Z-R 関係のばらつきに最初の段階に立ち戻って補正を行うことで、地上雨量データを用いることなしに X-MP 情報を最大限に有効に活用して雨量評価精度を高めようとする提案である。一方、加藤手法は、そのような理論的ではあるが複雑な処理を避け、X-MP レーダ雨量値とCバンドレーダ雨量値の比を求めて、その比でCバンドレーダ雨量を補正しようとする提案である。各種手法の詳細については、参考文献を参照のこと。

表-3 Xバンドマルチパラメータレーダ情報をCバンド単偏波レーダの精度向上に活用するための3種類の解析手法

No	論文名	Cバンドレーダ雨量値の算出手法
1	Xバンド偏波レーダを用いた雨滴粒径分布とその時空間構造及び降水量の推定手法の開発 (土木研究所 牛山他 <sup>5)</sup> ) ※以降「土研手法」と呼ぶ	X-MP の Z、Kdp から Nw と Kdp の関係を用いて Z-R 関係の係数 B、 $\beta$ を推定し、Z-B、Z- $\beta$ 関係を求める。これらの関係式を C-band の Z に当てはめることで、Z-R 関係から降雨強度を求める。
2	X-band MP レーダと C-band レーダを併用した降雨推定手法の開発 (京都大学 山口他 <sup>6)</sup> ) ※以降「山口手法」と呼ぶ	X-MP の Z、Kdp から制限 $\mu$ - $\Lambda$ 関係を用いて Z-R 関係の係数 B、 $\beta$ を推定し、Z-B、Z- $\beta$ 関係を求める。これらの関係式を C-band の Z に当てはめることで、Z-R 関係から降雨強度を求める。
3	Xバンドマルチパラメータレーダ情報と気象庁レーダ情報を用いた降水ナウキャスト (防災科学技術研究所 加藤他 <sup>7)</sup> ) ※以降「加藤手法」と呼ぶ	X-MP 合成雨量と C-band 合成雨量から補正係数 $\alpha$ を求め、X-MP 観測範囲外の C-band 合成雨量の補正に適用する。X-MP のデータが存在するメッシュは X-MP の値をそのまま適用する。

ここで、Z-R、Z-B、Z- $\beta$  関係で想定した式は以下のとおりである。

<Z-R 関係：いわゆる B $\beta$  式>  $Z = BR^\beta$  (B、 $\beta$ ：定数)

Z：レーダ反射因子、R：降雨強度

<Z-B 関係>  $B = \exp(a*Z + b)$  (a、b：定数)

<Z- $\beta$  関係>  $\beta = \exp(c*Z + d)$  (c、d：定数)

1) Z-B、Z-β 関係

土研手法・山口手法によって X-MP レーダでの Z-B、Z-β 関係を求め、両対数図での回帰直線を求めた。表-4 (上図、中図) に 2010 年 7 月 5 日の関東レーダによる結果の例を示す。それぞれのケースの違いは以下の通り。

- Case1 : 図の範囲内にプロットされるデータを全て用いて回帰式を求める。
- Case2 : Z 値の範囲を 30dB と 50dB を境界として 3 分割し、各範囲でそれぞれ回帰式を求める。
- Case3 :  $Z \leq 30\text{dB}$  および  $Z \geq 50\text{dB}$  では、B、 $\beta$  を一定とし、その間で回帰式を求める。

ここに、表-4 の下図は、Kdp 法による雨量評価値を仮の真値と見なして横軸にとり、縦軸にそれぞれ同定した Z-B、Z-β 関係式を用いて雨量を評価した値をとったものである。

その結果、Case1 では、特に強雨時に雨量を過大評価する傾向があり、Case3 が、Case1, 2 における強雨時の雨量過大評価傾向を最も抑制し、バランス良く精度を確保できると期待できることがわかった。このことから、以下の検討では、Case3 の方法を用いる。なお、土研手法と山口手法の結果を比較すると、Z-B、Z-β 関係の符号は両手法で一致しているものの、数値としては、土研手法においてそれぞれの関係式の傾きが大きくなっている。

表-4(1) Z-B、Z-β 関係の回帰分析 (土研手法)

2010/07/05 関東レーダ (土研手法)		
Case 1	Case 2	Case 3
Z-β 関係 (横 : Zh、縦 : β)		
	Case01 と同じ	
Z-B 関係 (横 : Zh、縦 : B)		
R(Z-R)-R(Kdp)関係 (単位 : mm/hr)		
強い雨が過大傾向	R=120m/hr 付近で段差。強い雨が特に過大評価	強い雨の過大傾向が case01 に比べ抑えられている

表-4(2) Z-B、Z-β 関係の回帰分析 (山口手法)

2010/07/05 関東レーダ (山口手法)		
Case 1	Case 2	Case 3
Z-β 関係 (横: Zh、縦: β)		
	Case01 と同じ	
Z-B 関係 (横: Zh、縦: B)		
R(Z-R)-R(Kdp)関係 (単位: mm/hr)		
強い雨が過大傾向	R=120mm/hr 付近で段差。強い雨が特に過大評価	強い雨の過大傾向が case01 に比べ抑えられている

## 2) 降雨推定精度の評価

上記における Case3 の場合分けによる土研手法・山口手法のそれぞれについて、2010～2012 年の期間中に全国の X-MP レーダで観測された主要な降雨 12 事例 (レーダサイト毎に分ければ 36 事例) に適用し、X-MP レーダの Kdp 法による雨量評価値を最も信頼性の高いものとして仮の真値と見なした上で、それと比較することにより、精度評価を行った (表-4(1) (2) の下図は一つのイベントにおける一例である)。ここで、各降雨イベント別に Z-B、Z-β 関係を同定した場合に加えて、降雨成因 (台風性、低気圧性、前線性、局地的大雨) 毎にまとめて両関係式を同定した場合を併せて検討した。その結果をまとめたものが表-5 である。土研手法・山口手法ともに、レーダ定数 BB を一つの最適値に固定するよりも相関係数・総雨量比ともに改善する効果があることが分かった。特に、総雨量比において、固定 BB が約 6 割程度と明らかな過小評価傾向であるのに対し、平均的に 1 に近い値まで近づけることができたこと (=バイアスを的確に補正できたこと) は特筆できる。土研手法と山口手法の差は小さいが、わずかに土研手法の方が良い結果となった。また、降雨イベント別に Z-B、Z-β 関係を個別に最適化しなくても、あらかじめ主要降雨成因毎に最適関係式を求めておくことで、ほぼ同レベルの精

度を確保できることも確認できた。以下、本手法をCバンドレーダ雨量の精度向上に活用できるかの検討を行うことになるが、当初の目的とは異なるものの、X-MP レーダにおいてしばしば見られる、降雨減衰等により KDP 法が適用できず B $\beta$  法を適用せざるを得ない状況における最適なレーダ定数 B,  $\beta$  の設定においても、本手法は有効であるものと期待される。

表-5 X-MP レーダにおいて、Z-B、Z- $\beta$  関係式によりレーダ雨量を算出する手法の精度評価結果  
(比較基準値は KDP 法による 1 分雨量評価値)

	相関係数			総雨量比		
	土研手法	山口手法	固定B、 $\beta$	土研手法	山口手法	固定B、 $\beta$
Z-B、Z- $\beta$ 関係の係数: 降雨別に評価	<b>0.653</b>	0.645	0.619	<b>1.02</b>	1.06	0.621
Z-B、Z- $\beta$ 関係の係数: 降雨成因別に一つの 関係にまとめて評価	<b>0.653</b>	0.645	0.619	<b>1.05</b>	1.08	0.621

次に、上記検討を通して X-MP レーダにより得られた降雨 (成因) 別の最適 B,  $\beta$  を C バンドレーダの Z 値に当てはめることで、C バンドレーダ観測雨量の精度改善を図ることができるかについての検証を行った。ここでは、土研手法・山口手法に加藤手法を加えて検討を行った。なお、原理的には C バンドと X バンドにおける Z 値は一致するはずであるが、実際にはしばしば大きく異なっていることから、C バンドレーダと観測領域の重なる X-MP レーダの Z 値同士を比較して Z 値の補正を行うケースについても検討を行った。その結果を表-6 に示す。

表-6 C バンドレーダにおいて、X-MP レーダから得られた Z-B、Z- $\beta$  関係をあてはめて  
レーダ雨量を算出する手法の精度評価 (比較基準値は気象庁アメダス時間雨量)

	相関係数	総雨量比
全国補正合成	<b>0.796</b>	<b>1.181</b>
固定B、 $\beta$	0.346	0.425
土研手法(Z補正あり)	0.383	0.497
土研手法(Z補正なし)	0.274	0.791
山口手法(Z補正あり)	0.395	0.563
山口手法(Z補正なし)	0.269	0.871
加藤手法	<b>0.839</b>	<b>1.080</b>

土研手法と山口手法は、固定 B,  $\beta$  法よりは総雨量比を改善したが、現業の C バンドレーダで用いられている地上テレメータ雨量を活用した全国補正合成雨量以上に全体として精度を改善することはできなかった。但し、個別レーダサイト事例によっては効果を上げているケースもあった。その一方で、加藤手法について、唯一、全国補正合成雨量を上回る相関係数・総雨量比を達成し、現実的に精度改善に役立つことが実証された。

土研手法や山口手法が C バンド単偏波レーダの雨量評価精度改善に結びつかなかった最大の原因は、X-MP レーダと C バンドレーダの Z 値の相関の悪さである。レーダ方程式によれば、X バンドと C バンドの Z 値は同一値のはずであるが、実際には両者の食い違いは大きく、レーダサイトによっては無相関に近い事例もあり、Z 値の補正式を作成しても相関の改善は難しい状況にあった。理論通りに Z 値が一致しない最も大きな理由は、X-MP レーダと C バンドレーダで仮にほぼ同じ XY 座標メッシュ領域を観測していたとしても、その観測高度はほとんどの場合一致せず、また、観測時刻も厳密には一致せず、決して同じ降水粒子群を観測しているわけではないことが挙げられる。なお、本概要では説明を省略したが、X-MP レーダにより得られるマルチパラメータ情報から、降水粒子の粒径分布を推定するアルゴリズムにおいても、現状では Zh、Zv (水平偏波および垂直偏波での反射因子) における降雨減衰特性の差、雨滴粒径分布パラメータにおける  $\Lambda$ -No 結合関係の成立条件、等いくつかの仮定を設定しており、現実の状況に必ずしも対応できていない問題が残っている。但し、この点は、レーダ水文学上大きな課題を示すものではあるものの、今回の解析結果への影響の視点で見れば、先述した Z 値の不一致の問題に比べればマイナーなものと考えられる。

#### 【4】今後の課題・展望

##### (1) 密に設置された地上雨量計によるレーダメッシュスケールでのレーダ雨量の定量評価

我が国では前例のない、レーダ雨量観測メッシュスケールの狭領域に高密度に地上雨量計を配置し、レーダ観測値との比較を行う研究を行った。地上雨量観測条件（1mm 転倒雨量計）や風速影響の解明、十分な解析事例の確保等に課題を残したが、貴重な観測データベースを蓄積することができた。すなわち、レーダメッシュスケールでの地上雨量のばらつきが、レーダ雨量観測精度に大きな影響を与えているという明確な証拠は見いだせなかったが、レーダ観測条件（KDP 法もしくは Z-R 法）の違いが、レーダ雨量観測精度に明瞭な違いをもたらしており、KDP 法によるレーダ雨量は、（レーダサイトから 46km 地点においても）地上雨量と非常に良い一致をみせている点は確認できた。

今後、レーダメッシュスケール内での雨量のばらつきの影響を詳細に解明するためには、風の影響にも配慮しつつ、より細かい時間分解能・雨量分解能を有する雨量計を高密度に配置することが必要である。

##### (2) 洪水予測の観点からレーダに求められる計測精度の解明

レーダ雨量の観測精度の違いが、洪水予測の精度にどの程度影響を与えるのか、レーダ雨量の観測精度の改善が、どの程度洪水予測精度の改善に貢献できるのかを（降雨事例に応じて）客観的に評価する方法を開発した。具体的には、レーダ観測による不確実性を統計的に評価・抽出する手法、および、そのランダムな誤差特性を反映した降雨場の定量的かつ客観的な生成手法を開発し、分布型流出モデルを介して洪水流出解析に及ぼす影響を定量的に評価した。千種川の台風による洪水予測事例では、X-MP レーダの不確実性によるピーク流量予測誤差は 10%程度、下流水位で 10~15cm 程度であるとの検討事例が得られた。

本研究で開発した、レーダの誤差特性を定量的かつ客観的に考慮できる感度分析手法は、今後、レーダ雨量等の水文観測データの観測誤差が、洪水予測のみならず水文・水循環解析全般に与える影響（誤差伝播特性）を調べる方法として、大きな発展が期待できる。

##### (3) 局地的豪雨早期予測を行うための高速降雨予測モデルの開発

定性的な降雨発達・減衰モデルによる高速かつ確実な降雨予測手法の開発を行った。詳細気象モデルの解析なしで発達・減衰予測をあらゆる気象・地形状況に対して行うためには、より細かい時空間分解能の GPV データ（リアルタイム値及び予測値）が必要であることを明らかにした。

##### (4) Xバンド MP データを活用した Cバンドレーダ広域雨量評価精度改善手法の開発

X-MP レーダの情報を利用して C バンドレーダ雨量観測精度を向上する手法として、レーダ水文学に立脚した土研手法と山口手法、及び簡便で実用的な加藤手法の 3 者について、それらの効果について総合比較を行った。その結果、前 2 者について、X バンドレーダにおける Z-B 関係、Z- $\beta$  関係の定式化の有用性（固定 B $\beta$  法の精度改善効果）は確認できた。しかし、その定式化をもとにした C バンドレーダによる Z-R 関係の補正による C バンドレーダ雨量観測精度の向上については、効果が見られなかった。一方、X バンドと C バンドの合成雨量の比を用いて補正する加藤手法は、全国合成配信用雨量をさらに改善する安定した効果が得られた。

したがって、現時点での X-MP レーダおよび現業 C バンドレーダシステムを前提として判断する限り、C バンドレーダと X-MP レーダの合成プロダクト作成手法としては、上記 3 手法の中では加藤手法を採用するのが最善の選択肢と言える。但し、詳細を見ると、補正係数の閾値設定により補正係数が不自然な変化をする場合があり、実用化に当たっては注意が必要である。

レーダ水文学に立脚した土研手法および山口手法が現実に有効に機能しなかった最大の原因として、X バンドレーダと C バンドレーダの両者の Z 値の相関が悪い点が挙げられる。複数レーダにおいて時間的・空間的に厳密には同一でない対象から得られるマルチパラメータ情報を雨滴粒径分布推定等に高度に利用する場合に、どのように有効活用すべきかについて、今後、さらに研究を進める必要がある。また、マルチパラメータ情報から降水粒子の粒径分布情報を取得するアルゴリズムの改善も、今後に残された課題である。

(2013年3月)

#### <参考文献>

- 1) 藤岡奨, 佐山敬洋, 三浦裕司, 越田智喜, 深見和彦: レーダ雨量の不確実性を反映した降雨場の生成に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 69, No. 4, I\_319-I\_324, 2013.

- 2) 佐山敬洋, 藤岡奨, 越田智喜, 三浦祐司, 岩見洋一, 深見和彦: XバンドMPレーダによる雨量観測の誤差特性とその時空間構造を反映した降雨場生成法, 土木学会論文集 B1(水工学), vol. 70, No. 4, 2014 (投稿中)
- 3) 児島利治, 宝馨, 岡太郎, 千歳知礼: ラスター型空間情報の分解能が洪水流出解析結果に及ぼす影響, 水工学論文集, vol. 42, pp. 157-162, 1998.
- 4) 牛山朋来, 萬矢敦啓, 菅野裕也, 深見和彦: 2010年7月5日に板橋区で発生した局地的豪雨の数値実験, 土木学会論文集 B1(水工学), vol. 67, No. 4, pp. I493-I498, 2011.
- 5) 牛山朋来, 萬矢敦啓, 菅野裕也, 深見和彦: X-band MP レーダー情報を用いた C-band レーダー降水強度の改善手法の開発, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 68, No. 4, pp. I349-I354, 2012.
- 6) 山口弘誠, 金原知穂, 中北英一: X バンド偏波レーダーを用いた雨滴粒径分布とその時空間構造及び降水量の推定手法の開発, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 68, No. 4, pp. I367-I372, 2012.
- 7) 加藤敦, 真木雅之, 岩波越, 三隅良平, 前坂剛: X バンドマルチパラメータレーダ情報と気象庁レーダ情報を用いた降水ナウキャスト、水文・水資源学会誌, vol. 22, No. 5, pp. 372-385, 2009.