

3 要素技術の性能評価

3.1 要素技術の基本性能

(1) 最大予測時間

実証研究では、実証技術導入前に実証地区住民を対象としたアンケート調査を実施した。その結果、図 3-1 に示すとおり過去の浸水被害時の対策にかかった時間は最大 20 分であったため、情報配信にかかる時間を考慮し予測時間を 30 分と設定した。

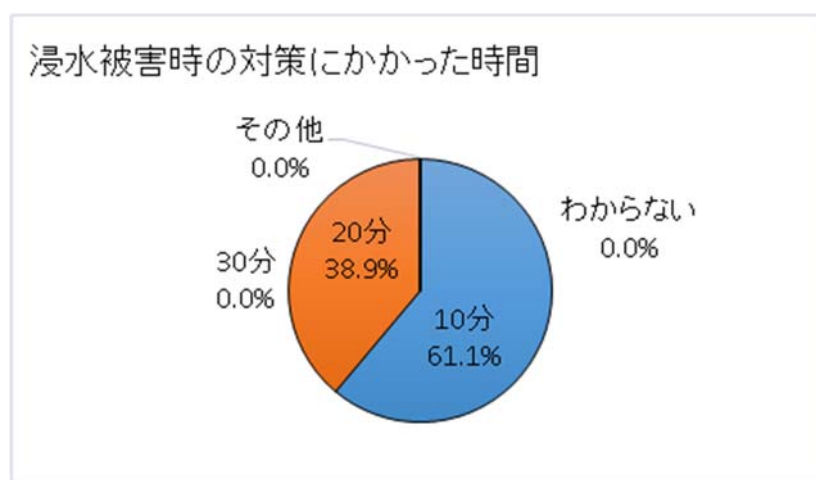


図 3-1 浸水被害時に対策にかかった時間（導入前アンケート調査抜粋）

(2) 予測配信時間

予測時間を 30 分と設定した結果を踏まえ、降雨観測から予測情報配信までの時間を 5 分以内と決定した。図 3-2 に観測から予測情報配信までの時間を示す。

これにより、図 3-3 に示すとおり最大 25 分後の浸水予測情報配信を行うことで、既存の浸水対策施設の運転支援、住民への自助・共助支援に必要な 20 分間のリードタイム確保を可能とした。

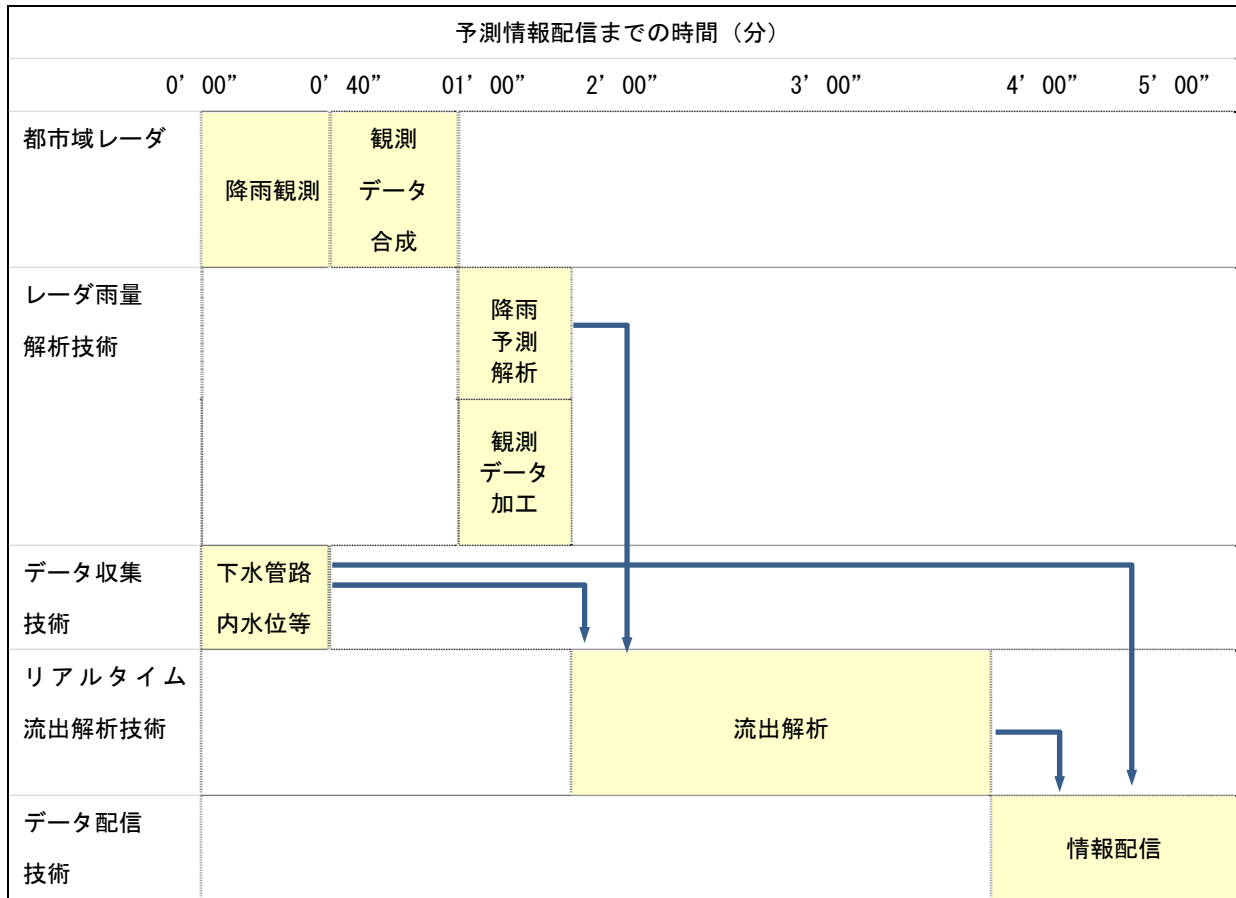


図 3-2 観測から予測情報配信までの時間

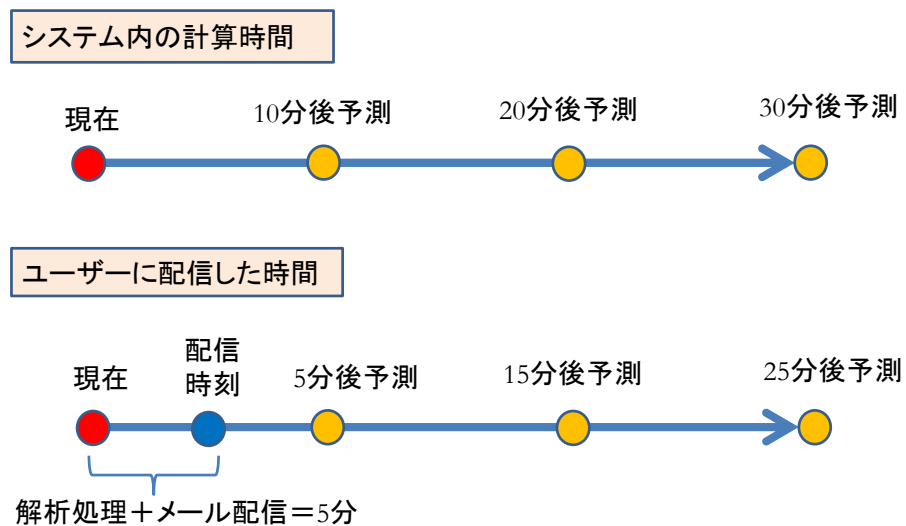


図 3-3 配信時間の考え方

3.2 性能評価一覧

実証技術を構成する要素技術毎に定めた性能目標および評価方法について表 3-1 および表 3-2 に示す。なお、確認項目を設定した理由等については、後述する各項目の目的および性能目標を参照することとし、表内に該当頁を記載する。

また、導入効果の評価として施設運転支援に基づく浸水被害軽減効果、情報配信による自助・共助の促進効果、経費回収年を求める。

表 3-1 評価項目一覧

要素技術	確認項目	評価目標および性能目標	評価方法等
都市域 レーダ	降雨発生早期検知 (P169)	①雨量の検知時刻 →XMP の降雨検知時刻と同じ、もしくはそれより早い時刻であること。	高度 500m の雨を対象として、0.5mm/h を都市域レーダが最初に検知した時刻と XMP が最初に検知した時刻を比較する。
	降雨観測精度 (P172)	①相関係数 →XMP 以上であること。 ②RMSE →XMP 以下であること。	レーダユニット 3 台中心から、10km 以内、20km 以内、30 km 以内に位置する地上雨量計とレーダ雨量をそれぞれ 10 分雨量で比較する。
	信号減衰による 欠測域 (P193)	①欠測域率 →0% であること、 XMP と比較して、欠測域が少ないこと。	高度 500m 観測領域において全降雨を対象に、XMP と都市域レーダの観測可能域に対して発生した欠測域の面積を比較する。
レーダ雨量 解析技術	降雨予測精度 (P223)	①予測誤差 →累積雨量及び各時刻雨量の誤差量が、 ・移流、特異平均、特異中央で実測値に近い値となること。 ・特異最大でプラス方向の誤差となること。	降雨予測パターン（移流、特異最大、特異平均、特異中央）毎の降雨予測精度を予測誤差および累積雨量にて比較する。

表 3-2 評価項目一覧

要素技術	確認項目	評価目標および性能目標	評価方法等
リアルタイム 流出解析 技術	流出解析精度 (P247)	①管路内水位 →NS が 0.7 以上 ②浸水発生位置, 範囲, 浸水深 →浸水実績と同等 ③浸水発生時間 →浸水実績と同等	実測値と解析値を比較 ※②③は, 今回, 浸水が発生する降雨が観測されなかったため, 過去の浸水発生降雨にて評価する。
	施設運転支援, 自助・共助支援に有効な予測パターンの選定 (P267)	①施設運転支援 →水位立ち上がり～平常時水位までの期間で, 予測精度が高いこと。 ②自助・共助支援 →必要とするリードタイムを確保できること。	①施設運転支援 →移流と特異最大における水位実測値と予測値の差を要求性能と比較する。 ②自助・共助支援 →移流と特異最大の水位予測値に基づき算出したリードタイムと要求性能を比較する。

3.3 都市域レーダの特徴と性能評価

3.3.1 都市域レーダの特徴

(1) Xバンド MP レーダ

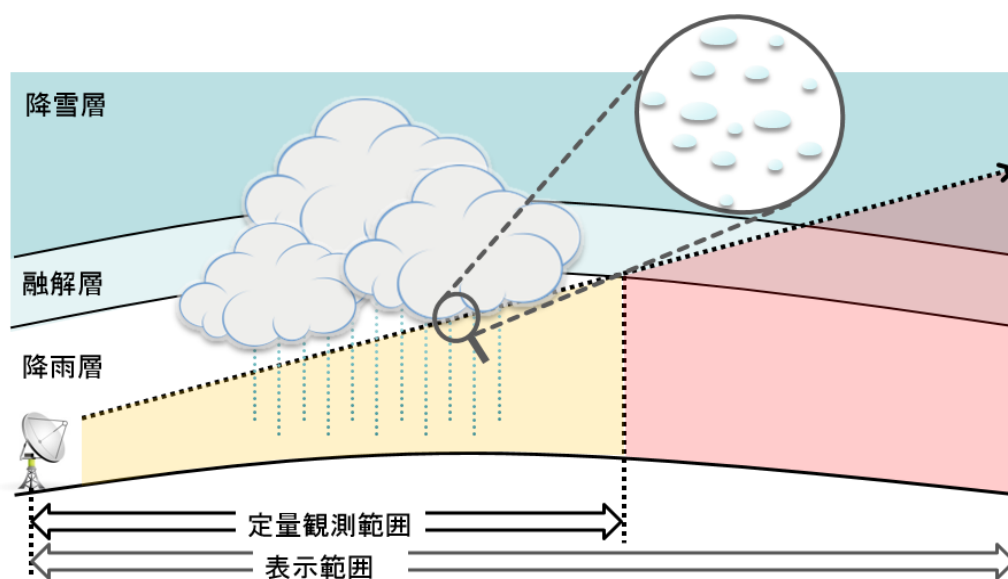
都市域レーダは、小型 X バンド MP レーダである。

MP レーダは、水平偏波と垂直偏波の 2 種類の電波を発射して、それぞれの反射した電波の位相差から雨滴の大きさを算定する。雨滴がレーダに接近あるいは離遠していると、反射した電波の波長は雨滴の移動速度分だけ変化する。これをドップラー効果といい、発射と反射電波の波長の違いにより雨滴の移動、すなわち風向きを把握できる。レーダ観測範囲が 2 基以上重なった範囲では、レーダ方向以外の風向きも把握できる。

(2) 観測範囲・高度

XRAIN においては図 3-4 に示すように、出水期において上空から落下する氷の粒が融けて雨の粒に変わる高さ（融解層）よりも低い高度の雨量を観測できる範囲を定量観測範囲として定めている。

都市域レーダにおいては、観測範囲は 30km であり、30km 地点での観測高度は 1800m 程度であるため、出水期における融解層よりも低い高度を観測している。



出典：国土交通省「川の防災情報」(<http://www.river.go.jp/x/notes3.html>)

図 3-4 XRAIN の定量観測範囲

(3) 分解能

都市域レーダの距離分解能は75m、ビーム幅は 2.7° であり、下水道排水区域をカバーする10km程度の範囲において、きめ細かな観測ができる。

(4) 高い設置性

都市域レーダの観測範囲は半径30kmと狭いが、アンテナ径0.75m、レドーム径約1m、重量約68kgと小型・軽量なため、運搬・搬入が容易でクレーン等の重機を使用せず人力による設置も可能である。そのため、図3-5に示すとおり、スペースの限られた建物屋上に設置可能になるなど設置性が高くなっている。これにより、設置工期・コストの大幅な削減を実現でき、本実証研究においては、一箇所あたり設置工期は2日間であった。家庭用100V電源を利用可能な環境に配慮した省電力設計となっている。都市域レーダの機器・維持管理コストを表3-3に示す。



図 3-5 スペースの限られた建物屋上への設置例

表 3-3 都市域レーダの機器・維持管理コスト

コスト項目	費用
機器（工事含む）	約 3000～3500 万円/基
維持管理	約 300～500 万円/年/基

都市域レーダは従来の気象レーダに比べて安価であるため、図 3-6 に示すとおりレーダユニットを複数台設置することで、非常に強い雨の後ろに控えている雨を別のレーダユニットで観測することが可能となり、電波消散による欠測域を軽減することができる。

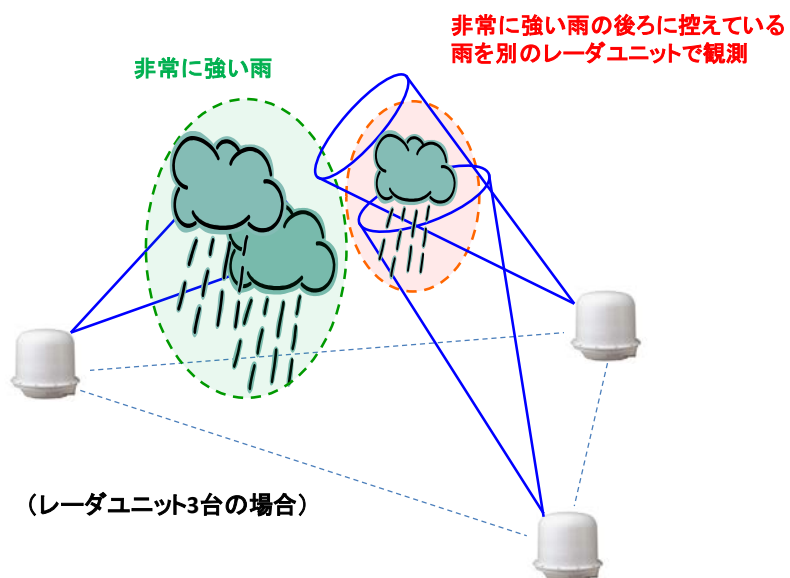


図 3-6 電波消散への対応

3.3.2 降雨発生早期検知の評価

(1) 評価方法

1) 目的

都市域レーダの設置性の高さを活かし、低高度を観測できるよう設置することで、図 3-7 に示すとおり、従来の気象レーダに比べ、低層の雨滴を検知しやすくなることが期待される。この特徴を利用して、低層から発達し豪雨となる降雨を出来る限り早期の検知による、施設運転支援および自助・共助支援のリードタイム確保への寄与を確認することが目的である。

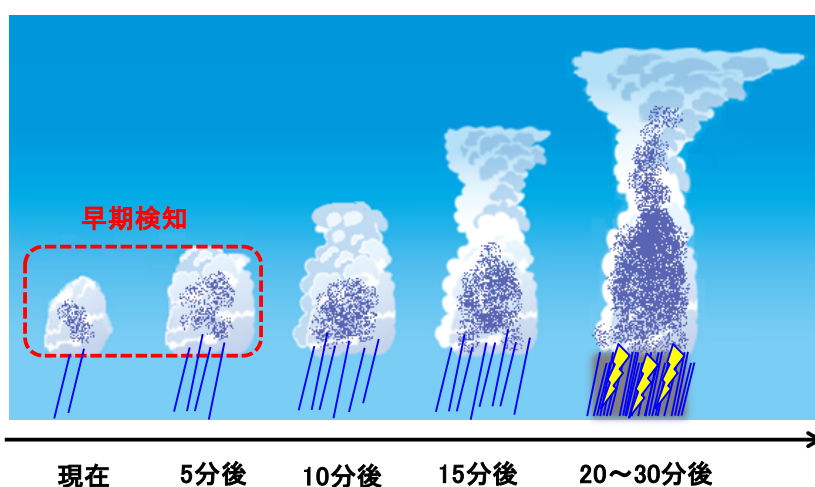


図 3-7 低高度の降雨観測による豪雨となる降雨の早期検知イメージ

2) 性能・目標

都市域レーダの降雨検知時刻と XMP の降雨検知時刻を比較し、XMP の検知時刻と同じ、もしくはそれより早い時刻であることとした。

3) 評価手順

都市域レーダの高度 500m の観測領域に対して、降雨強度 0.5mm/h を都市域レーダが最初に検知した時刻と XMP が最初に検知した時刻を比較し、評価した。

ただし、図 3-8 に示すように、富山市においては XMP (水橋局) が都市域レーダの近く (約 8km) にあり、XMP は富山市上空の低高度付近を観測していることから、早期検知の評価に適さないため、福井市のみ評価した。比較する観測高度は、都市域レーダの高度 500m、および XMP の高度 2000m 付近とした。

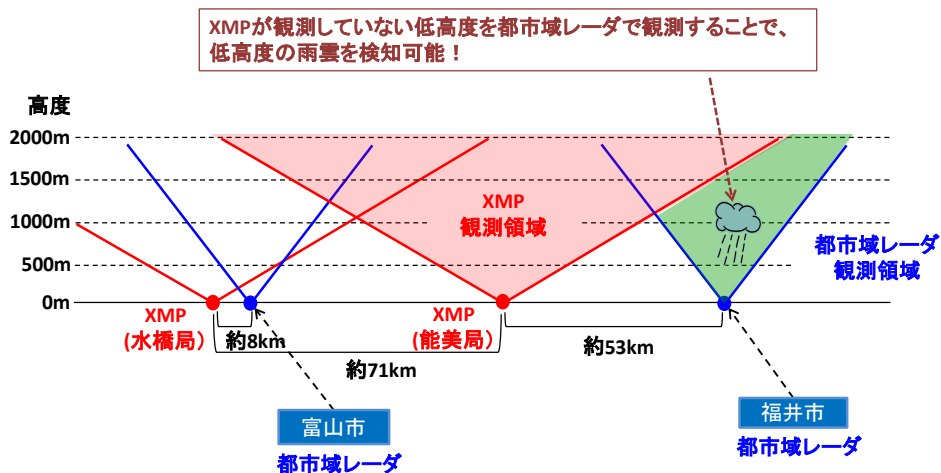
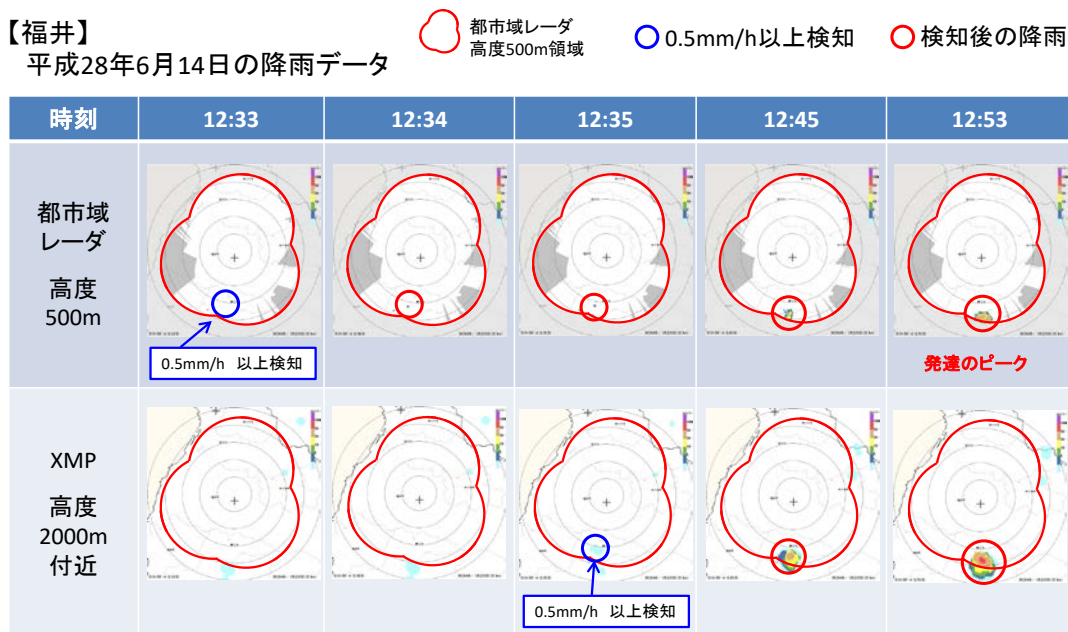


図 3-8 実証研究における XMP 及び都市域レーダの観測高度の関係

(2) 評価結果

ほとんどの降雨が移流による降雨であったが、高度 500m の低層から発達したと考えられる降雨を都市域レーダで XMP より 1~2 分早期検知できた事例を 3 ケース確認した。その 3 事例を図 3-9、図 3-10、図 3-11 に示す。

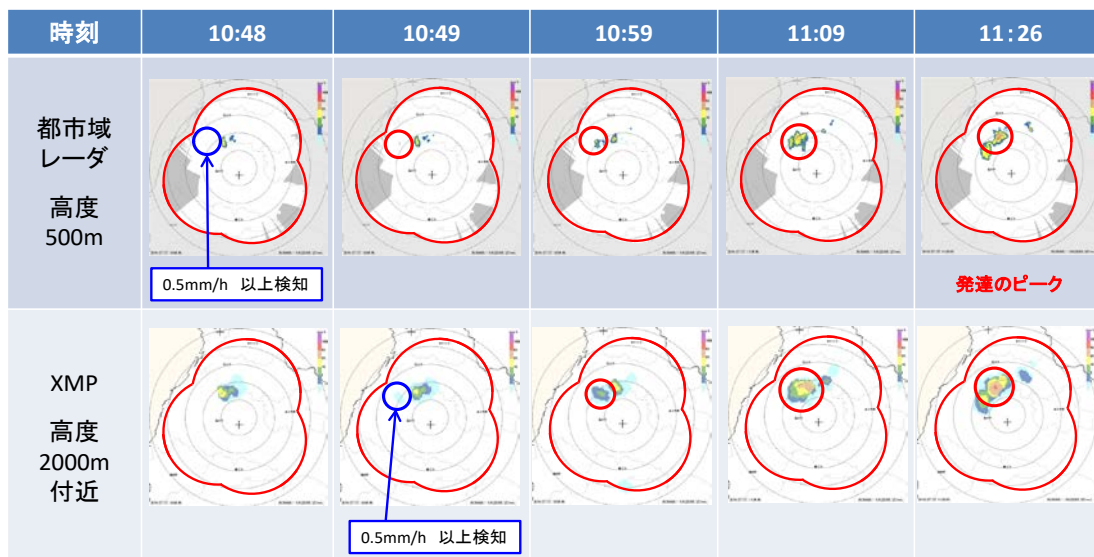


【結果】 都市域レーダで2分早く検知

図 3-9 降雨早期検知事例 1 (平成 28 年 6 月 14 日の降雨データ)

【福井】
平成28年7月27日の降雨データ

都市域レーダ 高度500m領域 0.5mm/h以上検知 検知後の降雨

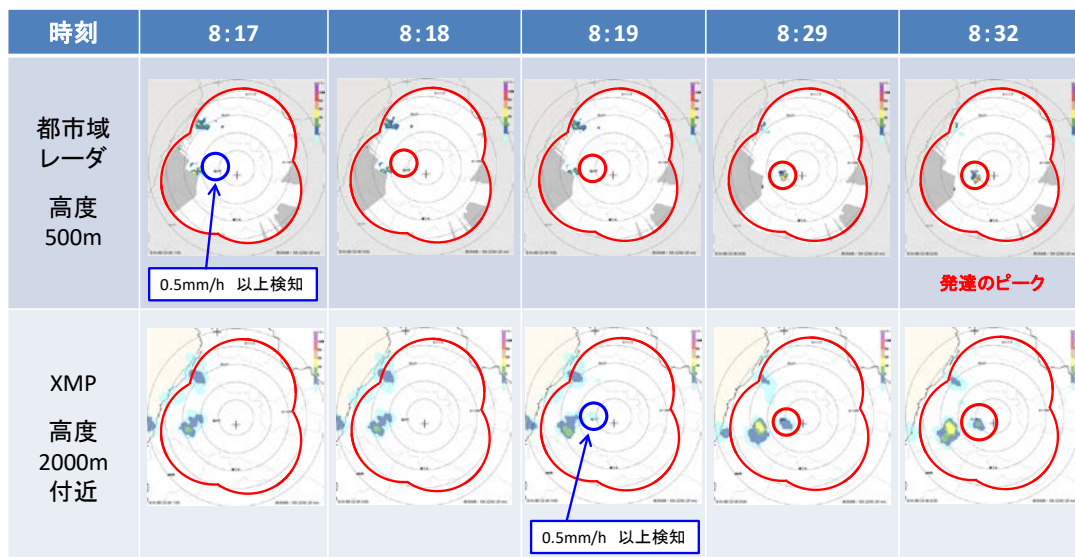


【結果】 都市域レーダで1分早く検知

図 3-10 降雨早期検知事例 2 (平成 28 年 7 月 27 日の降雨データ)

【福井】
平成28年8月3日の降雨データ

都市域レーダ 高度500m領域 0.5mm/h以上検知 検知後の降雨



【結果】 都市域レーダで2分早く検知

図 3-11 降雨早期検知事例 2 (平成 28 年 8 月 3 日の降雨データ)

3.3.3 降雨観測精度の評価

(1) 評価方法

1) 目的

基本性能である降雨観測精度の確認を目的に、実証フィールド上空の降雨を観測しているレーダ雨量計（都市域レーダおよび XMP）の降雨観測精度を検証した。福井市においては、XMP の補充として普及展開を想定し、XMP 定量観測距離 60km 周辺の同一の地上雨量計で評価した。富山市においては、基本性能である降雨観測精度を XMP と同等の距離にある同一の地上雨量計で評価した。

なお、検証に用いたレーダ雨量計のデータは、都市域レーダについてはレーダユニット 3 台の合成データを使用し、XMP については一般財団法人 河川情報センターが配信している XRAIN データを使用した。

2) 性能・目標

①相関係数

XMP の値に対して、同等またはそれ以上に強い正の相関があることとした。

②RMSE

XMP の値に対して、同等またはそれ以下に誤差が小さいこととした。

3) 評価手順

①降雨強度算出式および合成方法

精度評価で使用した都市域レーダの降雨強度算出式を図 3-12 に示す。レーダ反射強度および比偏波間位相差によって、図 3-12 の式 1 または式 2 の算出式を使用して、降雨強度を算出する

また、各レーダユニットで観測したデータの合成方法は、観測データを距離による重み付け平均処理して雨量を算出する距離重み付け平均値法を使用して評価を行った。

<降雨強度算出式>

- レーダ反射強度が30dBZ以上かつ比偏波間位相差が0.3deg/km以上の場合

$$(式1) \quad R = \alpha \times a_1 \times Kdp^{0.815}$$

$$a_1 = 19.6 + 2.71 \times 10^{-2} \times el + 1.68 \times 10^{-3} \times el^2 + 1.11 \times 10^{-4} \times el^3$$

R : 降雨強度 (mm/h) Kdp : 比偏波間位相差 (deg/km)

α : 算出係数 a_1 : 仰角による補正係数

el : 仰角 (範囲 0~90 deg)

- 上記以外

$$(式2) \quad Zh = BR^\beta$$

Zh : レーダ反射強度 (dBZ)

$B = 200, \beta = 1.6$: 雨滴係数

出典: 「気象と大気のレーダーリモートセンシング」 深尾 昌一郎、浜津 享助
(京都大学学術出版会, 2005)

図 3-12 降雨強度算出式

②雨量精度比較

地上雨量計と比較する都市域レーダの観測雨量データメッシュサイズを図 3-13 に示す。レーダユニット 3 台中心位置から 10km 以内にある地上雨量計は、高度 500m の観測範囲内にあるため、50m メッシュサイズの実況用観測データを使用した。レーダユニット 3 台中心位置から 10km~30km にある地上雨量計は、高度 500m の観測範囲外にあるため、高度 1500m を観測しているメッシュサイズ 250m の予測用観測データを使用した。また、都市域レーダと地上雨量計の配置図を図 3-14 に示す。

地上雨量計(10分値)を基準として、都市域レーダの観測雨量データ10分間平均値と比較する。

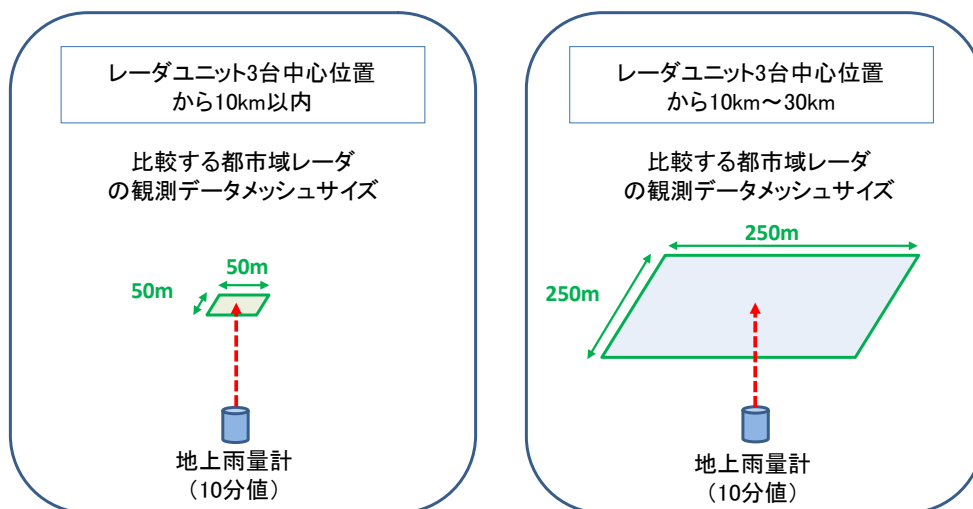


図 3-13 地上雨量計と比較する都市域レーダの観測雨量データメッシュサイズ

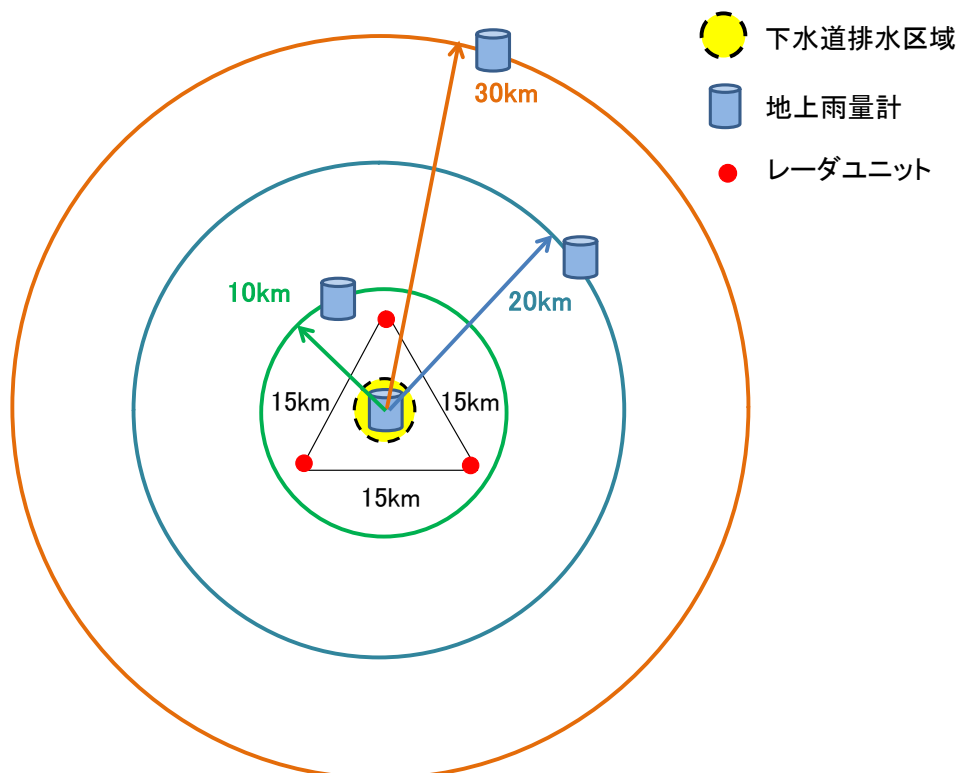


図 3-14 都市域レーダと地上雨量計の配置図

(a) 散布図による雨量精度比較

レーダユニット 3 台中心位置から 10km 以内に位置する地上雨量計とレーダ雨量をそれぞれ 10 分雨量で比較し、回帰係数、相関係数および RMSE（二乗平均平方根誤差）の値で評価した。また、レーダユニット 3 台中心位置から 10km 付近、20km 付近、30km 付近に位置する地上雨量計とレーダ雨量をそれぞれ 10 分雨量で比較し、観測距離による都市域レーダの観測精度の違いを、回帰係数、相関係数および RMSE の値で評価した。評価指標の内容を以下に示す。

- ・回帰係数：回帰曲線の傾き。1 に近いほど、地上雨量計との近似性が高い。
- ・相関係数：1 に近いほど、回帰係数（回帰曲線の傾き）との相関が高い。
- ・RMSE：0 に近いほど地上雨量計との誤差が小さい。誤差の算出方法は、地上雨量計を真値として、レーダ雨量との RMSE（平均二乗誤差）を求め、誤差量を判断する。0 に近いほど誤差が小さく降雨精度が高い。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}$$

N:データ数
X:レーダー雨量
Y:地上雨量計

(b)ハイエトグラフによる雨量精度比較

下水道排水区域内の位置する地上雨量計，レーダユニット 3 台中心位置から 10km 付近，20km 付近，30km 付近に位置する地上雨量計とレーダ雨量をそれぞれ 1 時間雨量で比較し，評価した。

評価した降雨は，下水道排水区内に新設した地上雨量計直上において，福井市・富山市の各都市域レーダで観測した降雨強度 (mm/h) の高い 5 降雨で検証を実施した。その一覧表を表 3-4 (福井市：狐川第六排水区地上雨量計)，表 3-5 (富山市：呉羽排水区地上雨量計) に示す。

表 3-4 (福井市) 都市域レーダ観測降雨一覧表

No.	(2016年)日付	観測機器	地上雨量計																	
			①福井			②第6排水区			③三国			④越廼			⑤大野			⑥今庄		
			総降雨量	1時間	10分間	総降雨量	1時間	10分間	総降雨量	1時間	10分間	総降雨量	1時間	10分間	総降雨量	1時間	10分間	総降雨量	1時間	10分間
1	10/9	都	27.4	13.5	3.9	25.7	15.2	4.4	19.9	5.5	2.3	25.2	8.1	5.5	5.6	4.3	2.4	1.0	1.0	0.7
		地	44.5	19.5	6.5	37.5	17.5	5.0	43.0	12.0	6.0	68.0	29.5	11.0	24.0	13.5	6.5	24.5	13.5	3.5
2	7/13	都	25.2	14.5	5.6	25.2	12.9	4.8	11.6	3.0	1.7	20.1	8.6	5.3	19.1	7.0	4.4	5.5	2.5	2.2
		地	39.5	23.0	9.0	39.0	20.0	6.0	39.0	16.5	10.0	44.0	17.5	16.5	37.0	10.0	5.5	52.5	12.0	10.5
3	10/17	都	23.5	9.5	2.0	27.2	11.3	2.6	23.5	6.1	1.7	28.3	8.3	2.1	13.8	4.9	1.4	0.6	0.3	0.2
		地	35.5	14.5	3.0	33.0	13.5	3.0	19.0	5.0	1.5	42.0	17.5	5.5	26.5	10.0	2.5	30.0	9.5	2.5
4	9/8	都	13.0	10.4	4.6	12.4	10.9	4.6	21.7	13.4	5.9	20.5	12.4	5.0	28.5	18.5	7.1	1.4	1.0	1.0
		地	20.0	14.5	5.5	17.0	14.5	6.0	28.5	21.0	11.0	45.0	19.0	12.0	37.5	22.0	7.5	21.0	13.5	5.5
5	6/25	都	16.6	8.0	2.2	17.8	9.3	2.4	17.8	10.5	3.7	21.0	9.6	2.8	26.6	6.9	3.8	7.1	2.9	1.7
		地	25.5	14.0	3.5	28.0	16.0	4.0	35.0	22.5	7.0	41.0	26.0	7.0	54.0	14.0	6.5	52.0	11.5	7.5

【計測機器】 都：都市域レーダ 地：地上雨量計

【単位】 総降雨量：mm/d 1時間最大雨量：mm/h 10分間最大雨量：mm/10min

表 3-5 (富山市) 都市域レーダ観測降雨一覧表

No.	(2016年)日付	観測機器	地上雨量計																				
			①富山			②呉羽排水区			③秋ヶ島			④伏木			⑤砺波			⑥魚津			⑦氷見		
			総降雨量	1時間	10分間	総降雨量	1時間	10分間	総降雨量	1時間	10分間	総降雨量	1時間	10分間	総降雨量	1時間	10分間	総降雨量	1時間	10分間	総降雨量	1時間	10分間
1	7/26	都	76.7	32.2	9.4	67.2	20.8	6.4	43.1	15.0	4.6	42.2	11.2	5.1	30.4	6.8	2.0	47.8	8.1	3.8	32.9	8.4	2.2
		地	98.5	42.5	14.0	88.0	29.0	11.5	38.5	15.0	5.0	64.0	16.0	9.5	26.0	5.5	2.5	64.0	19.5	8.5	48.5	10.0	3.0
2	9/18	都	49.9	15.0	3.3	50.3	16.1	4.0	53.9	16.2	4.0	36.1	9.6	2.1	40.9	6.8	2.7	50.9	9.3	2.4	22.8	5.1	1.6
		地	92.0	21.5	5.0	89.0	20.0	5.0	90.5	26.0	7.0	68.5	17.5	4.0	90.0	22.0	6.5	100.0	20.5	6.5	44.0	9.5	3.5
3	9/28	都	18.2	7.7	2.4	25.8	14.9	4.5	15.8	7.6	2.1	27.5	6.1	2.0	21.9	7.4	2.6	33.3	11.9	2.6	27.6	7.3	3.4
		地	30.5	11.0	4.0	39.0	19.5	5.5	29.0	15.5	4.0	43.5	10.5	4.0	32.5	15.0	5.0	51.5	28.5	7.0	40.5	11.0	5.0
4	9/8	都	39.2	21.1	6.1	32.0	14.2	5.6	38.9	18.4	4.8	23.5	11.9	4.9	18.0	11.7	4.5	21.4	6.9	2.1	21.0	6.9	2.9
		地	51.0	26.5	7.5	42.5	16.0	6.5	58.5	24.5	8.5	31.5	13.5	7.0	36.5	21.0	10.0	37.5	12.0	3.0	32.5	13.0	5.5
5	7/13	都	63.5	17.9	8.4	42.4	12.8	5.1	41.7	14.3	6.0	25.0	6.4	2.8	19.4	3.8	3.1	43.9	6.9	3.1	34.1	10.3	4.5
		地	103.5	37.0	17.0	59.0	17.5	12.0	69.0	24.5	9.5	30.5	5.5	3.0	24.0	5.0	3.5	48.5	9.5	3.5	40.5	11.5	6.5

【計測機器】 都：都市域レーダ 地：地上雨量計

【単位】 総降雨量：mm/d 1時間最大雨量：mm/h 10分間最大雨量：mm/10min

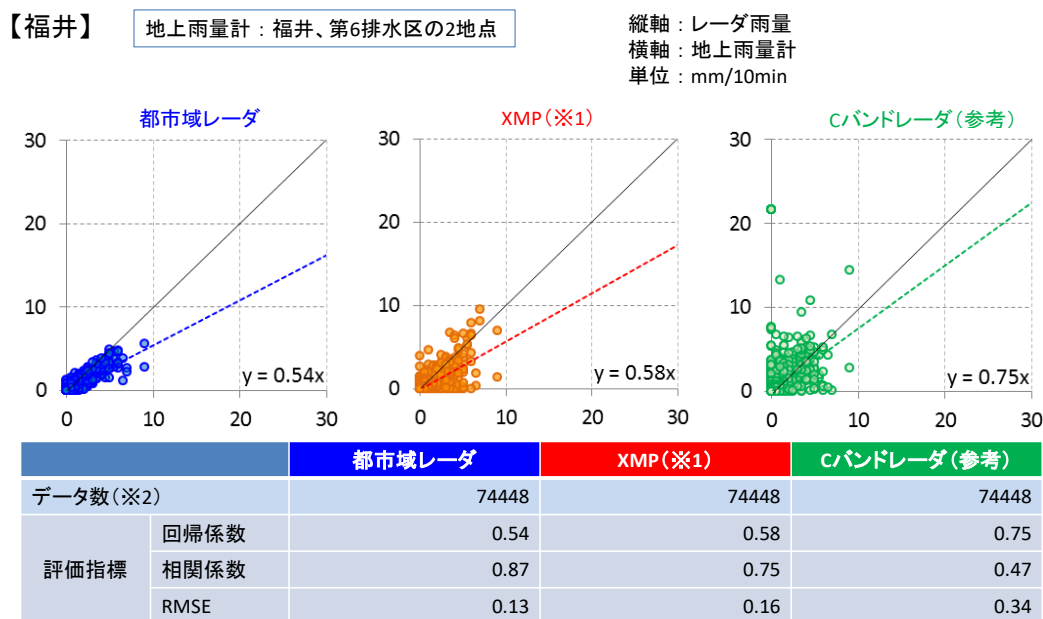
(2) 評価結果

1) 散布図による雨量精度比較

①福井市

(a)XMP との雨量精度比較

XMP の定量観測距離 60km 周辺において、相関係数の値は XMP 以上、RMSE の値は XMP と同程度であることを確認した。



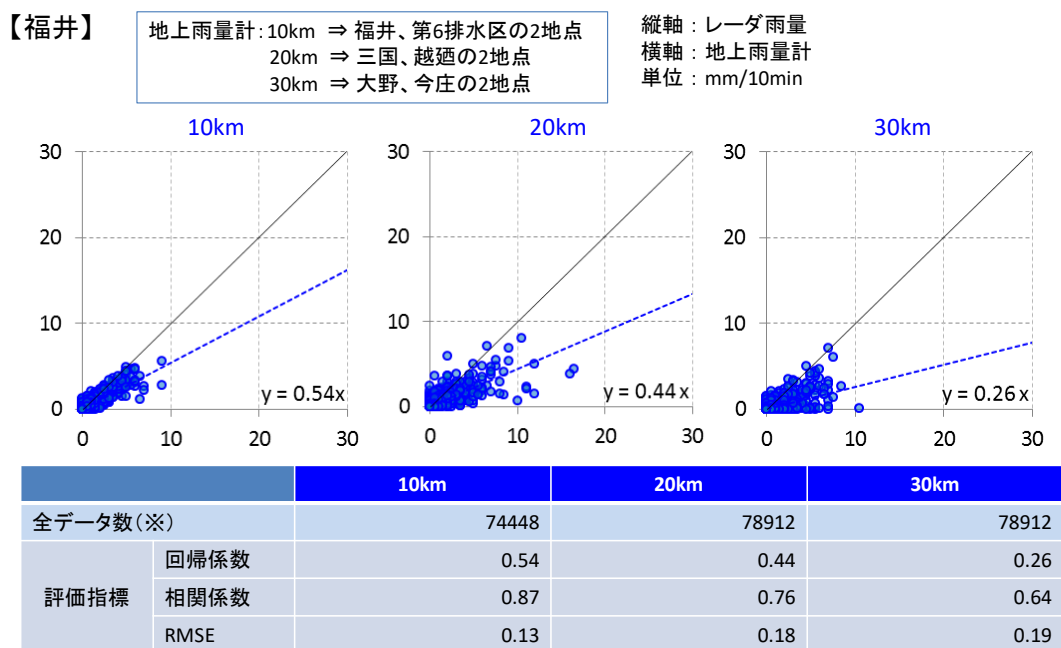
※1 能美局観測データ

※2 10分間雨量データの同じ時刻において、地上雨量計とレーダ雨量計の両方に雨量値が存在するデータ数

図 3-15 XMP との雨量精度比較 (福井市)

(b)観測距離別雨量精度比較

観測距離が遠くなるほど回帰係数および相関係数は低くなっていることを確認した。この結果より、観測距離に応じて観測精度が異なることがわかった。



※ 10分間雨量データの同じ時刻において、地上雨量計とレーダ雨量計の両方に雨量値が存在するデータ数

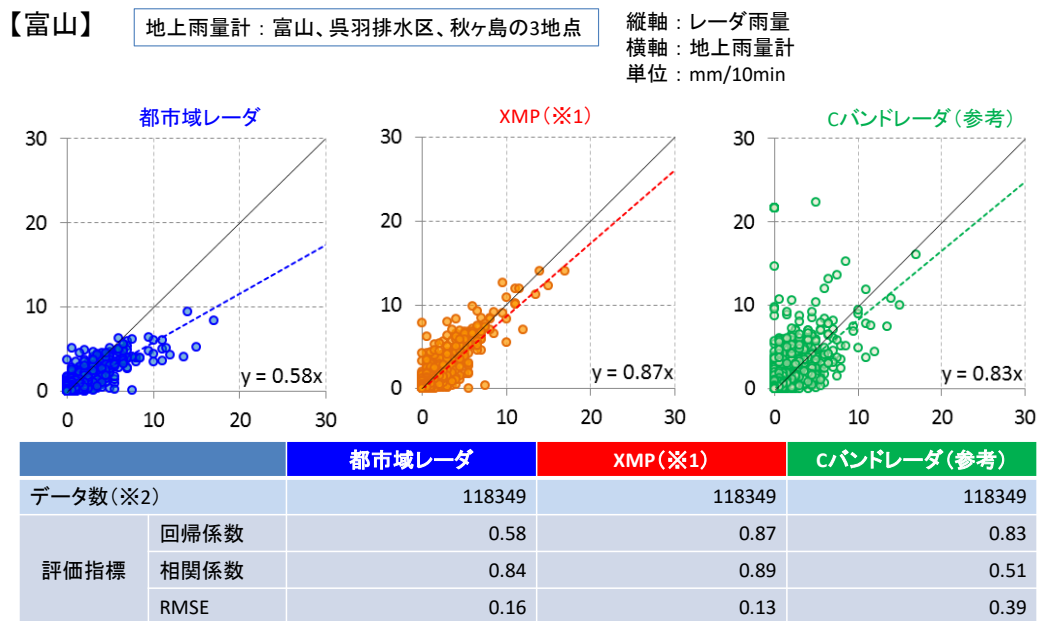
図 3-16 観測距離別雨量精度比較 (福井市)

②富山市

(a)XMP との雨量精度比較

(ア) XMP および都市域レーダから 0～10km 付近の観測範囲

相関係数の値は XMP と同等, RMSE の値も XMP と同等であることを確認した。



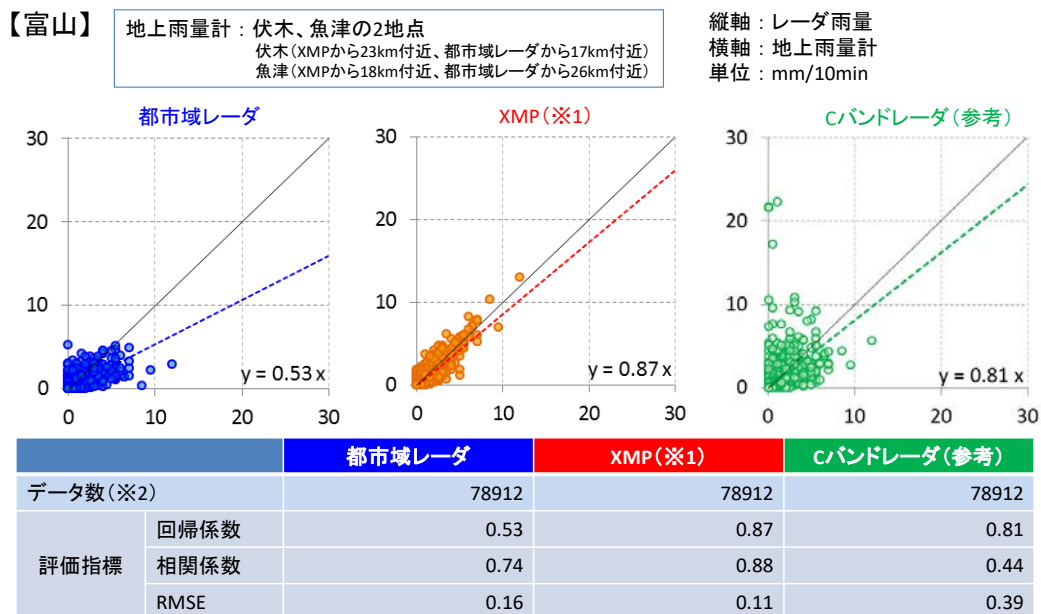
※1 水橋局と能美局の合成観測データ

※2 10分間雨量データの同じ時刻において、地上雨量計とレーダ雨量計の両方に雨量値が存在するデータ数

図 3-17 XMP との雨量精度比較 (観測範囲 0～10km 付近)

(イ) XMP および都市域レーダから 10～20km 付近の観測範囲

相関係数の値は XMP より若干低いことを確認した。また、RMSE の値は、XMP と同等であることを確認した。



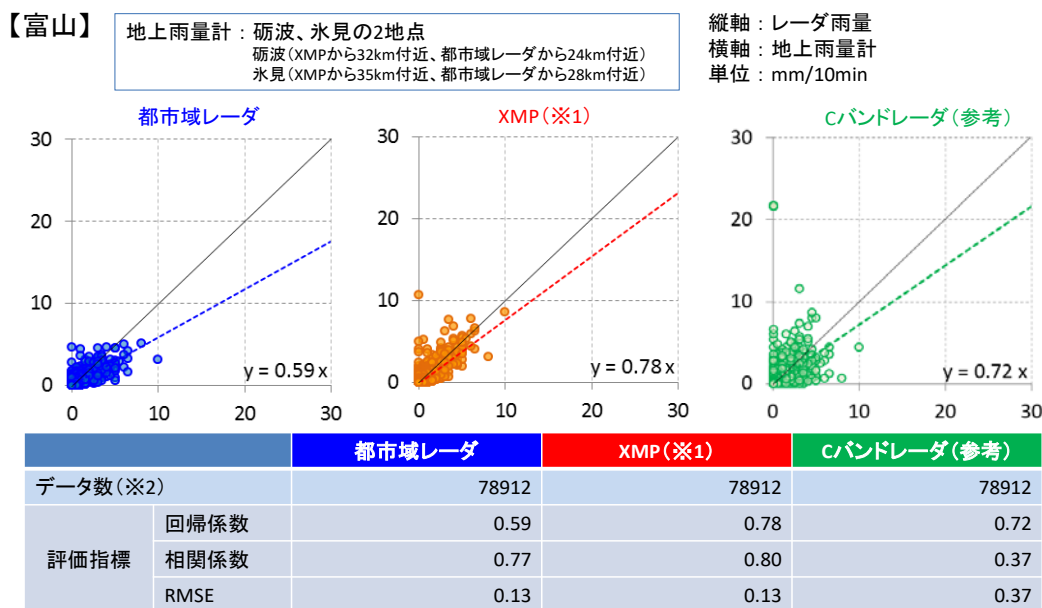
※1 伏木は水橋局と能美局の合成観測データ、魚津は水橋局観測データ

※2 10分間雨量データの同じ時刻において、地上雨量計とレーダ雨量計の両方に雨量値が存在するデータ数

図 3-18 XMP との雨量精度比較 (観測範囲 10～20km 付近)

(ウ) XMP および都市域レーダから 20~30km 付近の観測範囲

都市域レーダから地上雨量計までの距離は 24~28km 程度と、XMP の 30km 以上よりも近いにもかかわらず、都市域レーダの相関係数の値は XMP より若干低かった。また、RMSE の値は、XMP と同等であることを確認した。



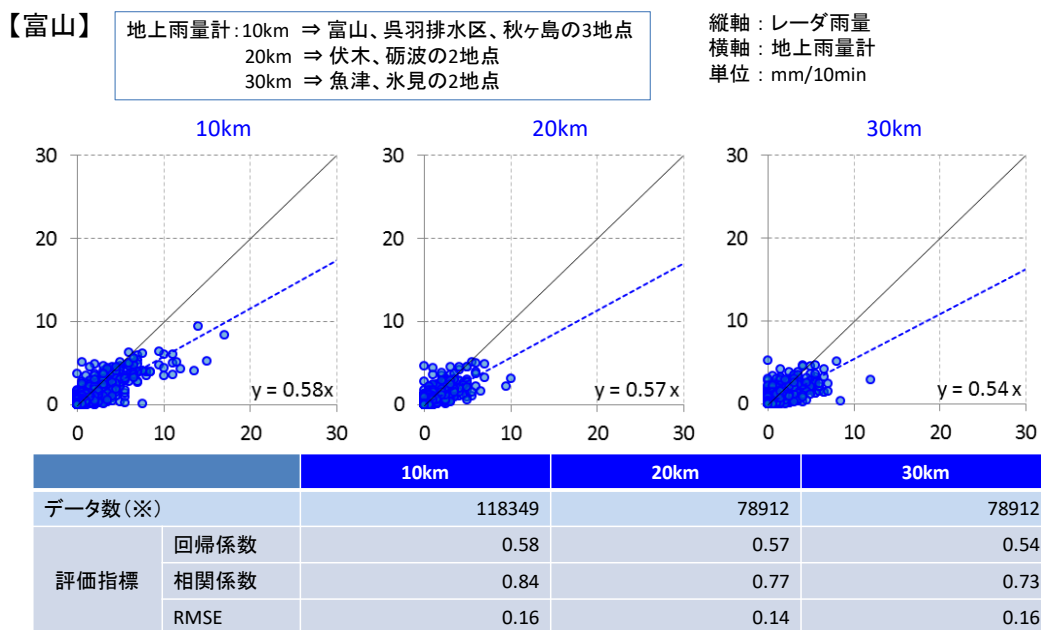
※1 水橋局と能美局の合成観測データ

※2 10分間雨量データの同じ時刻において、地上雨量計とレーダ雨量計の両方に雨量値が存在するデータ数

図 3-19 XMP との雨量精度比較 (観測範囲 20~30km 付近)

(b)観測距離別雨量精度比較

観測距離が遠くなるほど回帰係数および相関係数は低くなっていることを確認した。この結果より、観測距離に応じて観測精度が異なることがわかった。10kmの精度比較における相関係数の値は0.84、20kmの精度比較における相関係数の値は0.77、30kmの精度比較における相関係数の値は0.73であった。



※ 10分間雨量データの同じ時刻において、地上雨量計とレーダ雨量計の両方に雨量値が存在するデータ数

図 3-20 観測距離別雨量精度比較（富山市）

2) ハイエトグラフによる雨量精度比較

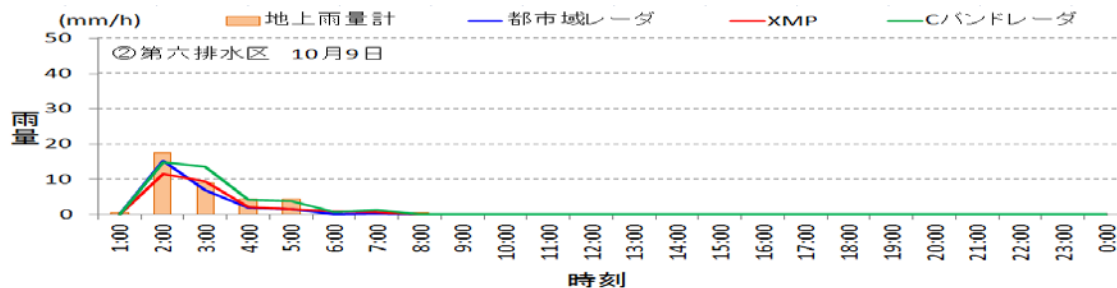
①福井市

観測距離が遠くなるほど、地上雨量計と比較して都市域レーダの雨量が弱く観測されていることを確認した。また、7月13日の7時、6月25日の2時においては、地上雨量計と比較して、雨量が弱く観測されていることを確認した。雨量が弱く観測される理由としては、使用している降雨量推定算出式で求められた雨量が低いこと、信号減衰発生による雨量の過小評価が考えられるため、降雨量推定算出式および合成方法を見直す必要がある。

(a) 観測日：平成 28 年 10 月 9 日

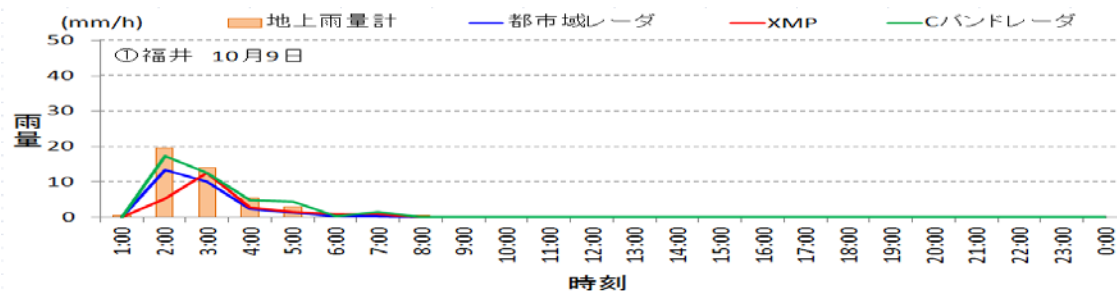
ア) 地上雨量計：②第 6 排水区（都市域レーダの観測範囲 ～約 10km）

※ XMP 能美局からの距離 約 55km



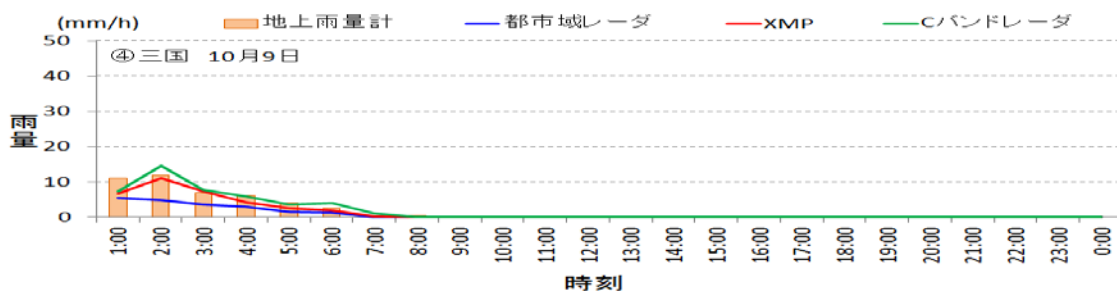
イ) 地上雨量計：①福井（都市域レーダの観測範囲 ～約 10km）

※ XMP 能美局からの距離 約 55km



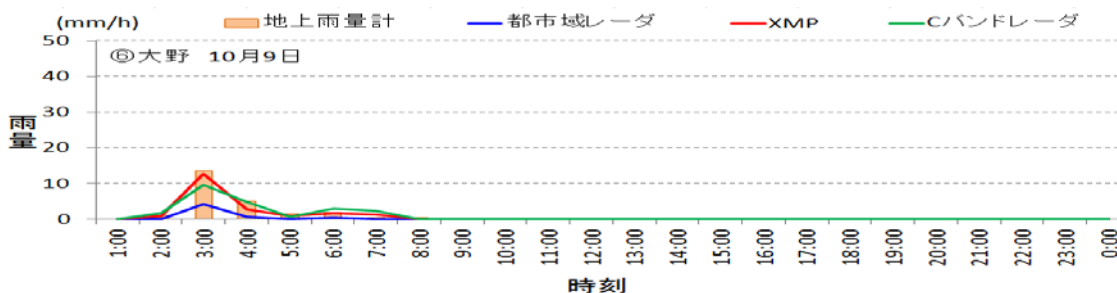
ウ) 地上雨量計：④三国（都市域レーダの観測範囲 ～約 20km）

※ XMP 能美局からの距離 約 70km



エ) 地上雨量計：⑥大野（都市域レーダの観測範囲 ～約 30km）

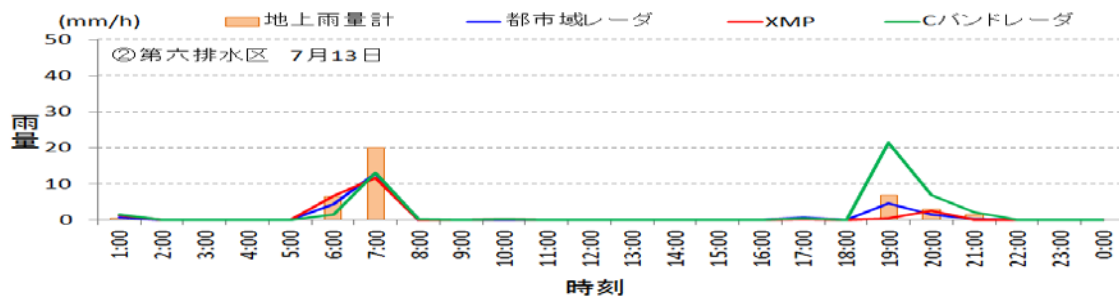
※ XMP 能美局からの距離 約 33km



(b) 観測日：平成 28 年 7 月 13 日

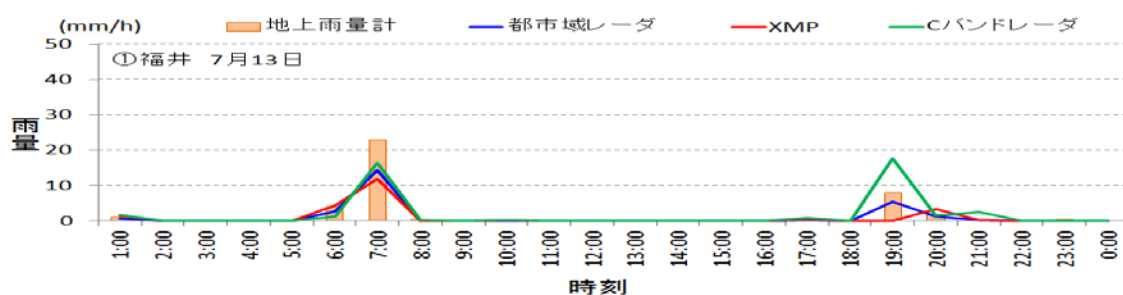
ア) 地上雨量計：②第 6 排水区（都市域レーダの観測範囲 ～約 10km）

※ XMP 能美局からの距離 約 55km



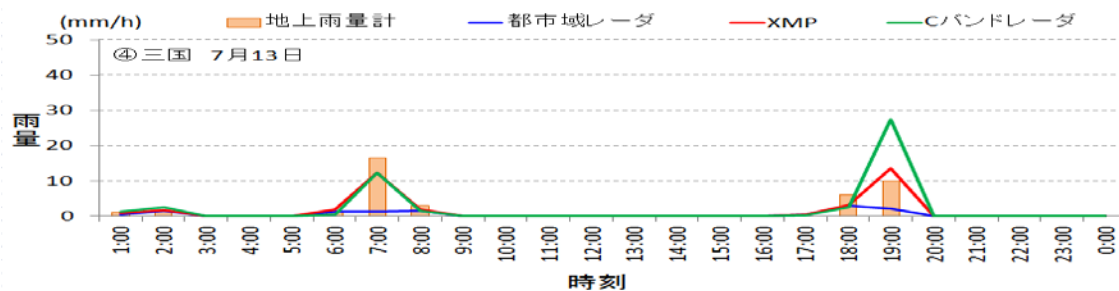
イ) 地上雨量計：①福井（都市域レーダの観測範囲 ～約 10km）

※ XMP 能美局からの距離 約 55km



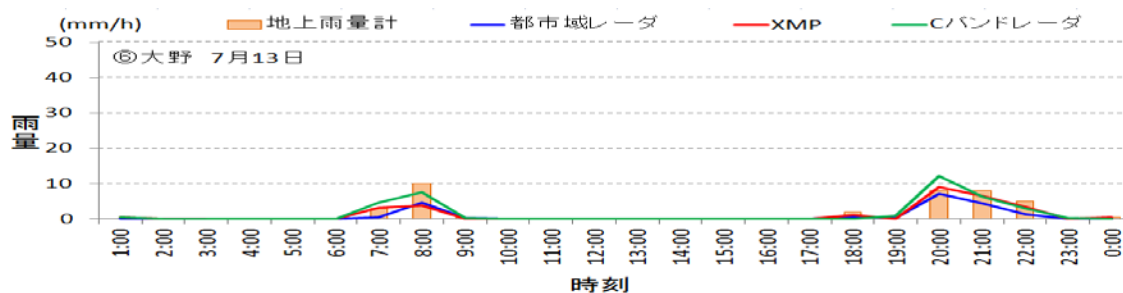
ウ) 地上雨量計：④三国（都市域レーダの観測範囲 ～約 20km）

※ XMP 能美局からの距離 約 40km



エ) 地上雨量計：⑥大野（都市域レーダの観測範囲 ～約 30km）

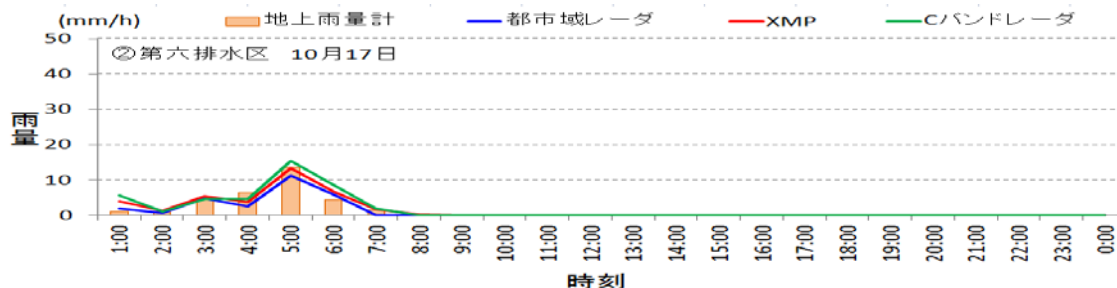
※ XMP 能美局からの距離 約 33km



(c) 観測日：平成 28 年 10 月 17 日

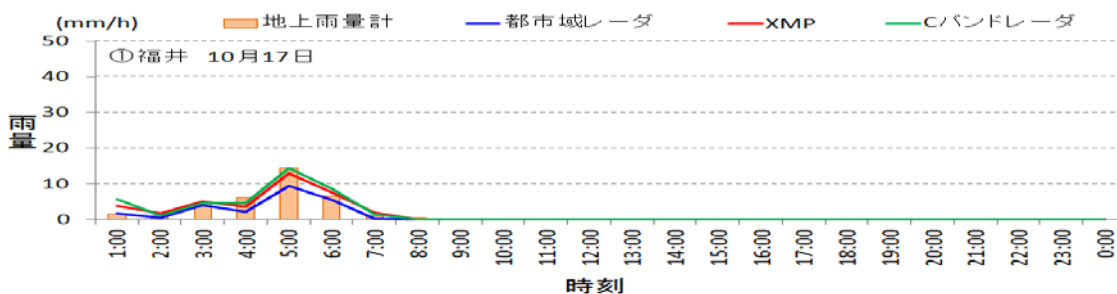
ア) 地上雨量計：②第 6 排水区（都市域レーダの観測範囲 ～約 10km）

※ XMP 能美局からの距離 約 55km



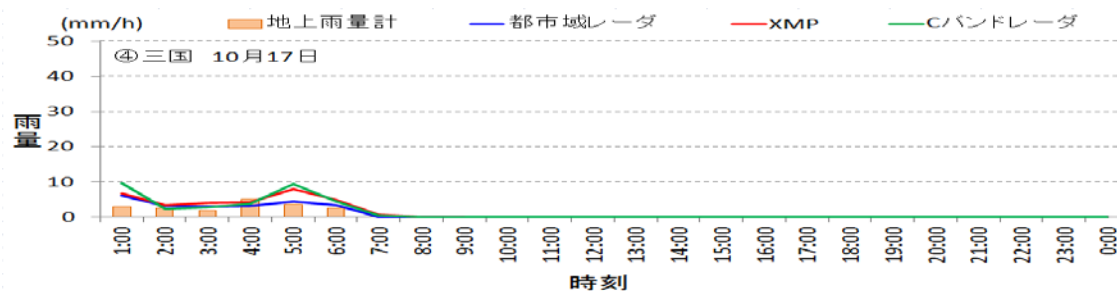
イ) 地上雨量計：①福井（都市域レーダの観測範囲 ～約 10km）

※ XMP 能美局からの距離 約 55km



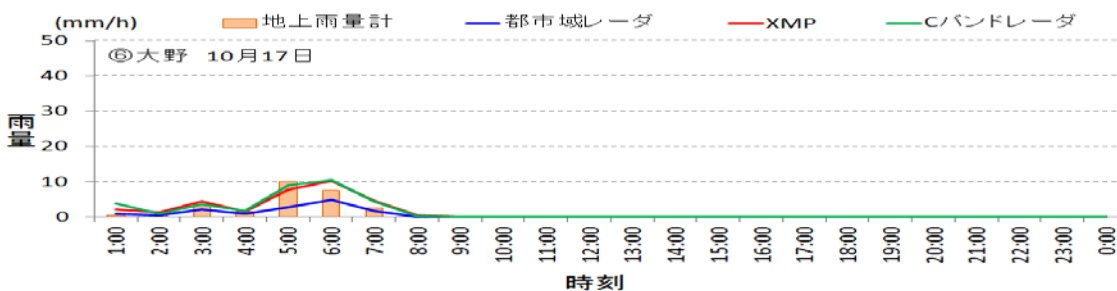
ウ) 地上雨量計：④三国（都市域レーダの観測範囲 ～約 20km）

※ XMP 能美局からの距離 約 40km



エ) 地上雨量計：⑥大野（都市域レーダの観測範囲 ～約 30km）

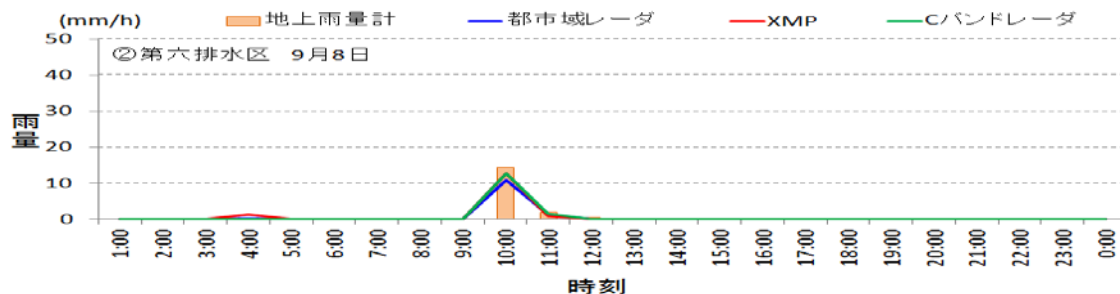
※ XMP 能美局からの距離 約 33km



(d) 観測日：平成 28 年 9 月 8 日

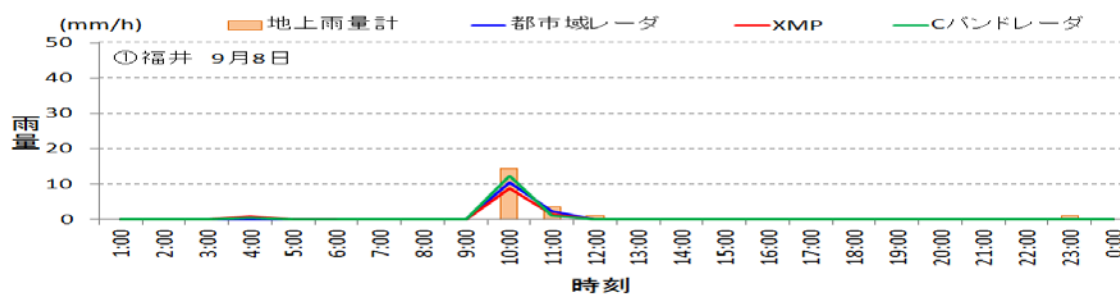
ア) 地上雨量計：②第 6 排水区（都市域レーダの観測範囲 ～約 10km）

※ XMP 能美局からの距離 約 55km



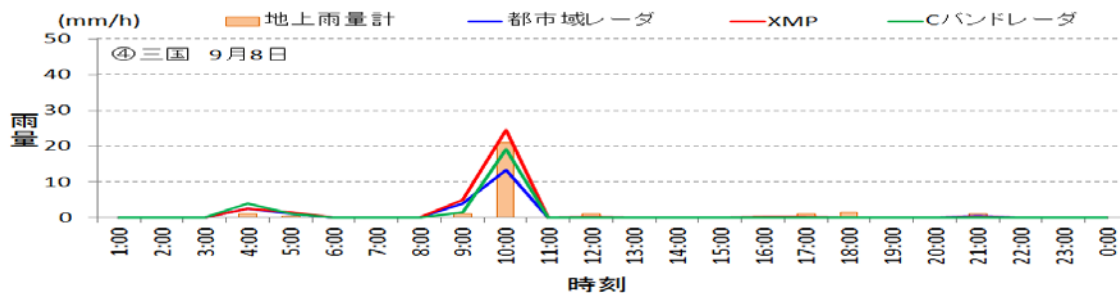
イ) 地上雨量計：①福井（都市域レーダの観測範囲 ～約 10km）

※ XMP 能美局からの距離 約 55km



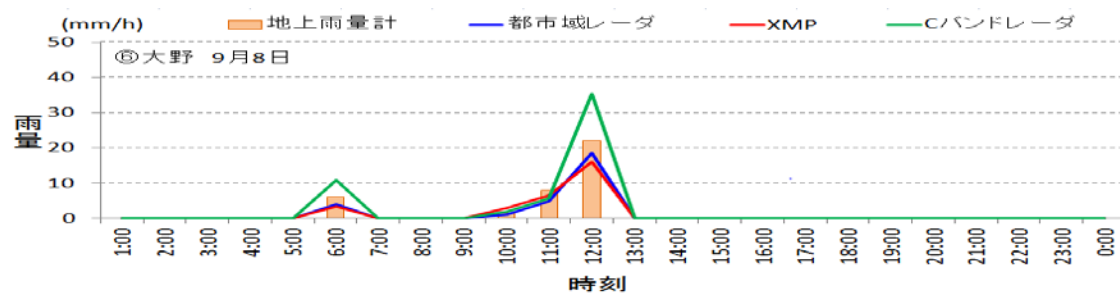
ウ) 地上雨量計：④三国（都市域レーダの観測範囲 ～約 20km）

※ XMP 能美局からの距離 約 40km



エ) 地上雨量計：⑥大野（都市域レーダの観測範囲 ～約 30km）

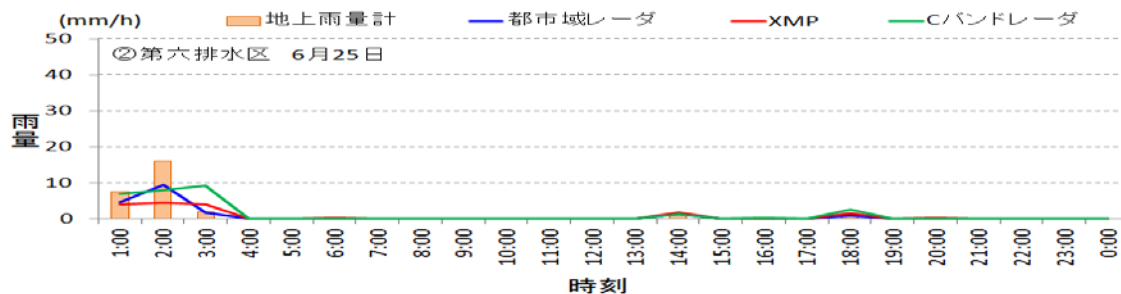
※ XMP 能美局からの距離 約 33km



(e) 観測日：平成28年6月25日

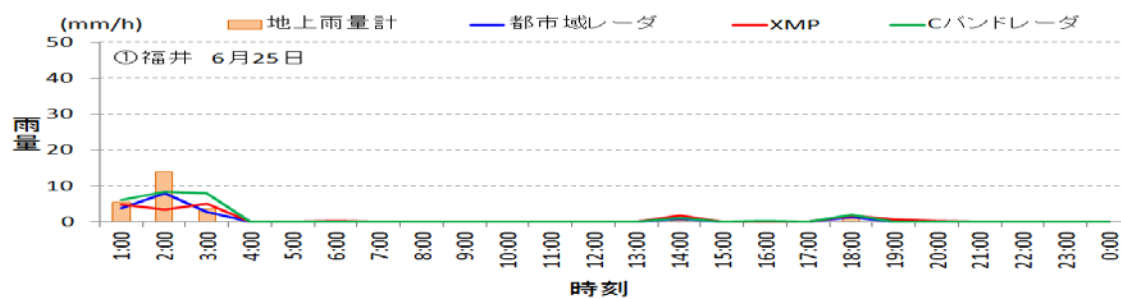
ア) 地上雨量計：②第6排水区（都市域レーダの観測範囲 ～約10km）

※ XMP 能美局からの距離 約55km



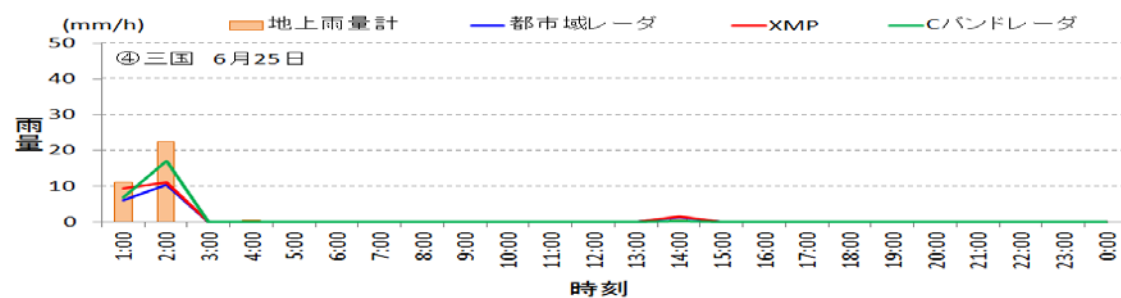
イ) 地上雨量計：①福井（都市域レーダの観測範囲 ～約10km）

※ XMP 能美局からの距離 約55km



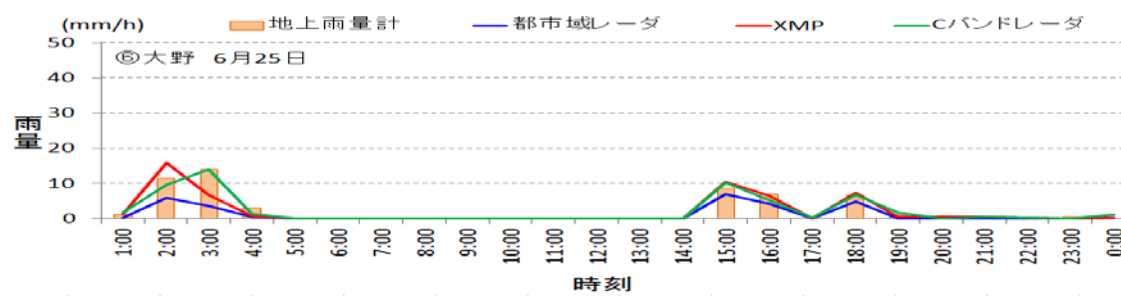
ウ) 地上雨量計：④三国（都市域レーダの観測範囲 ～約20km）

※ XMP 能美局からの距離 約40km



エ) 地上雨量計：⑥大野（都市域レーダの観測範囲 ～約30km）

※ XMP 能美局からの距離 約33km



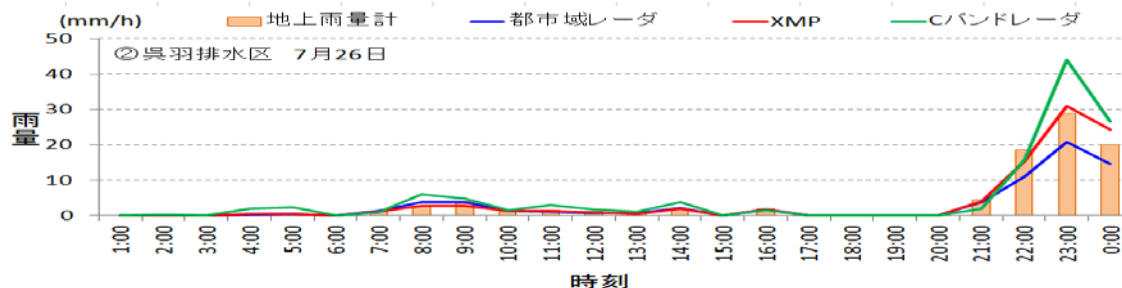
②富山市

観測距離が遠くなるほど、地上雨量計と比較して都市域レーダの雨量が弱く観測されていることを確認した。また、7月26日の「①富山」および「②呉羽排水区」の23時、7月13日の「①富山」の5時・17時においては、地上雨量計と比較して雨量が弱く観測されていることを確認した。雨量が弱く観測される理由としては、使用している降雨量推定算出式で求められた雨量が低いこと、信号減衰発生による雨量の過小評価が考えられるため、降雨量推定算出式および合成方法を見直す必要がある。

(a) 観測日：平成 28 年 7 月 26 日

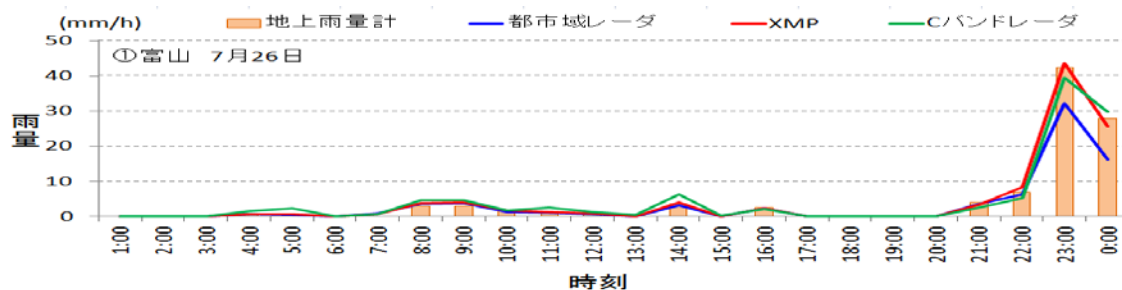
ア) 地上雨量計：②呉羽排水区（都市域レーダの観測範囲 ～約 10km）

※ XMP 水橋局からの距離 約 10km



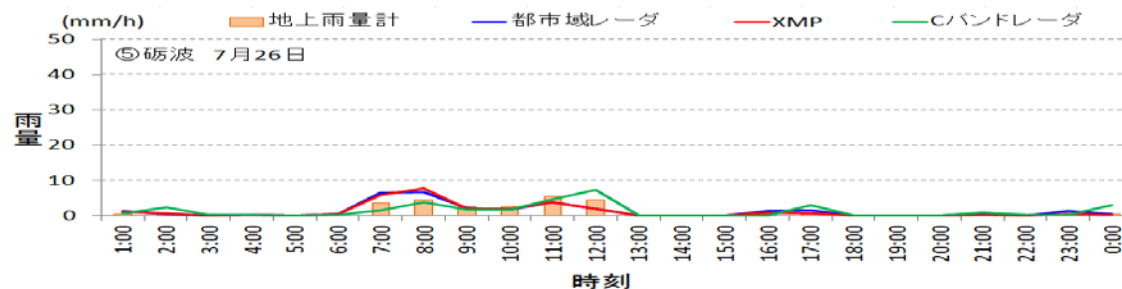
イ) 地上雨量計：①富山（都市域レーダの観測範囲 ～約 10km）

※ XMP 水橋局からの距離 約 7km



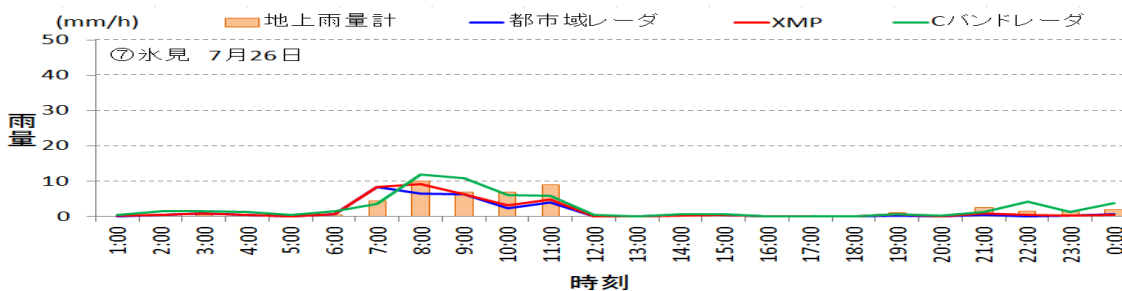
ウ) 地上雨量計：⑤砺波（都市域レーダの観測範囲 ～約 20km）

※ XMP 水橋局からの距離 約 30km



エ) 地上雨量計：⑦氷見（都市域レーダの観測範囲 ～約 30km）

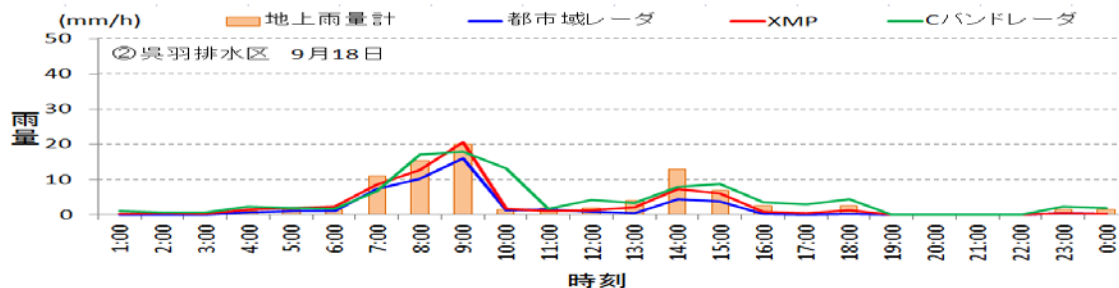
※ XMP 水橋局からの距離 約 33km



(b) 観測日：平成 28 年 9 月 18 日

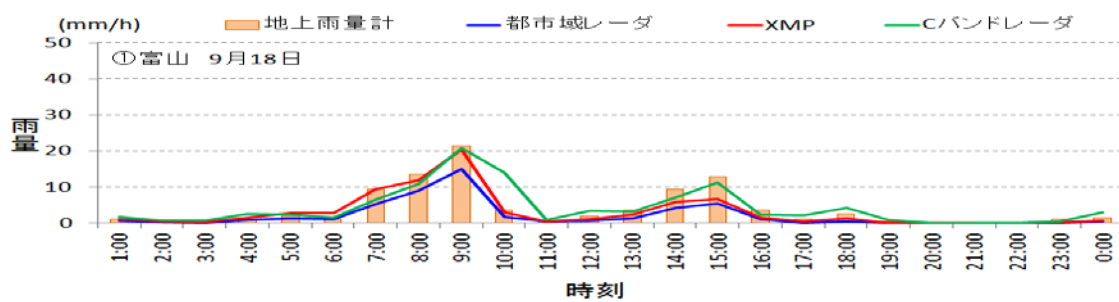
ア) 地上雨量計：②呉羽排水区（都市域レーダの観測範囲 ～約 10km）

※ XMP 水橋局からの距離 約 10km



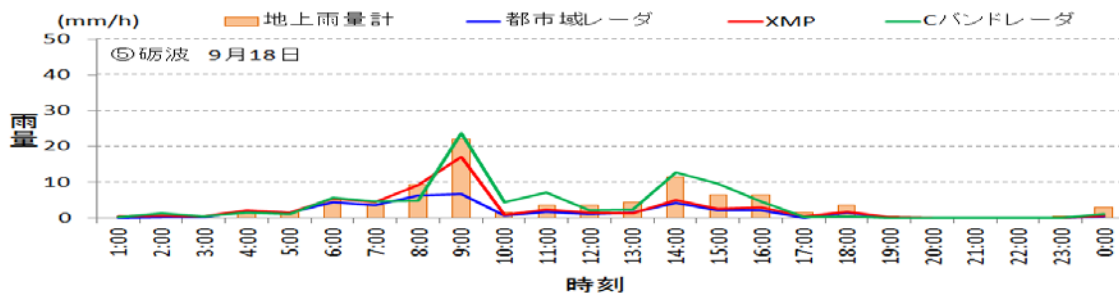
イ) 地上雨量計：①富山（都市域レーダの観測範囲 ～約 10km）

※ XMP 水橋局からの距離 約 7km



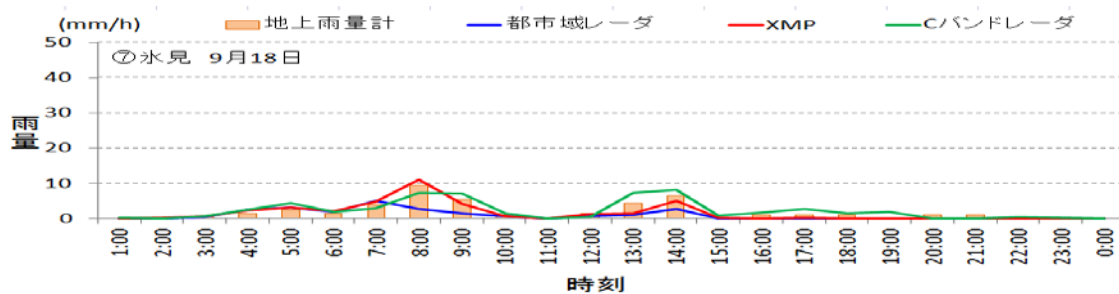
ウ) 地上雨量計：⑤砺波（都市域レーダの観測範囲 ～約 20km）

※ XMP 水橋局からの距離 約 30km



エ) 地上雨量計：⑦水見（都市域レーダの観測範囲 ～約 30km）

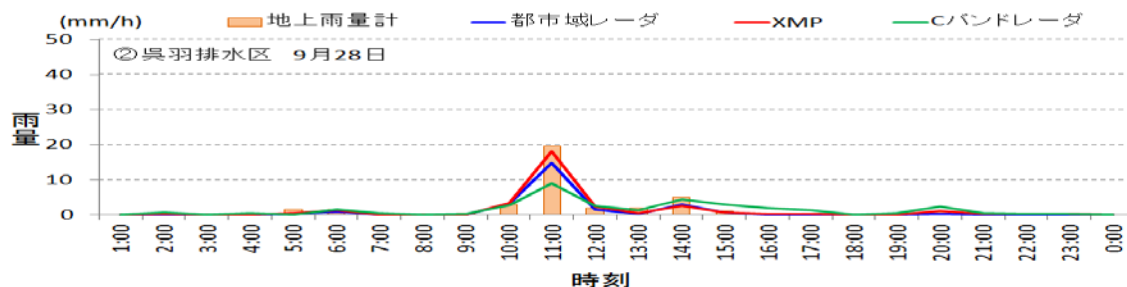
※ XMP 水橋局からの距離 約 33km



(c) 観測日：平成 28 年 9 月 28 日

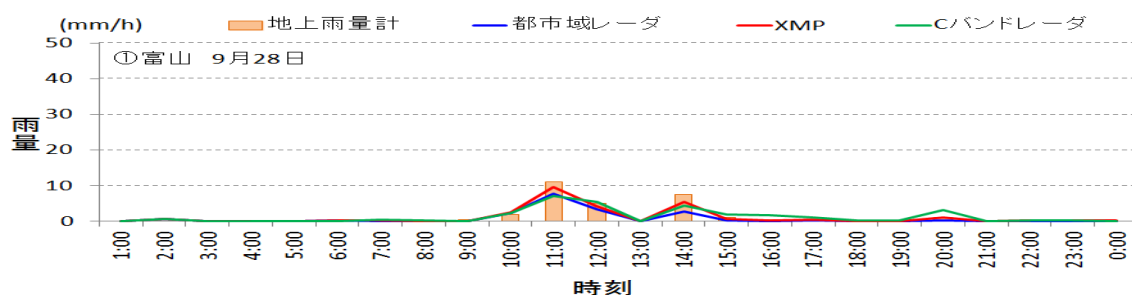
ア) 地上雨量計：②呉羽排水区（都市域レーダの観測範囲 ～約 10km）

※ XMP 水橋局からの距離 約 10km



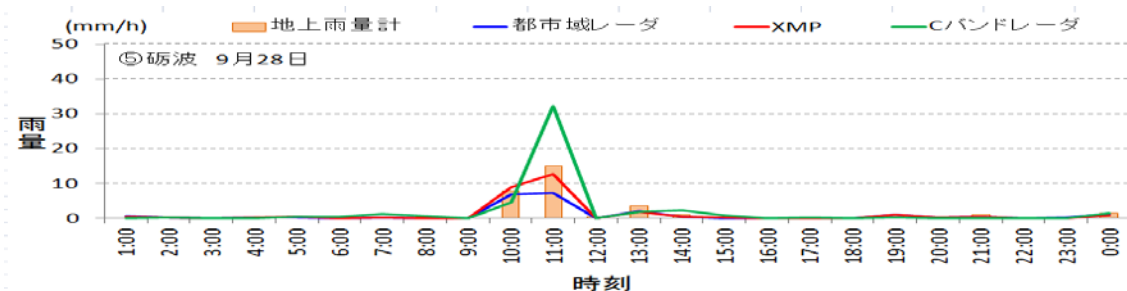
イ) 地上雨量計：①富山（都市域レーダの観測範囲 ～約 10km）

※ XMP 水橋局からの距離 約 7km



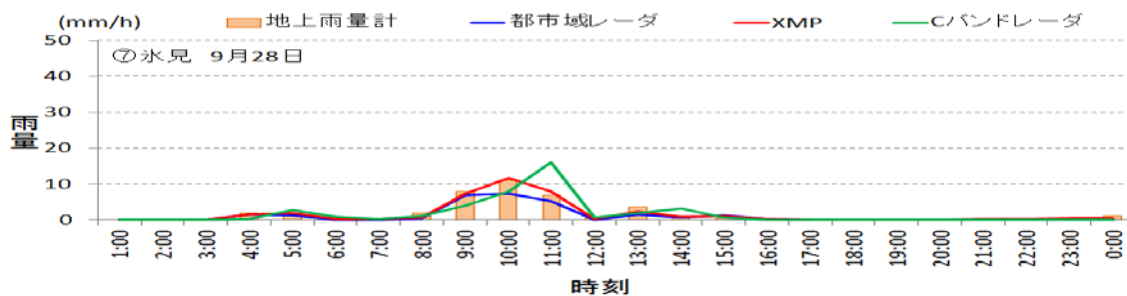
ウ) 地上雨量計：⑤砺波（都市域レーダの観測範囲 ～約 20km）

※ XMP 水橋局からの距離 約 30km



エ) 地上雨量計：⑦氷見（都市域レーダの観測範囲 ～約 30km）

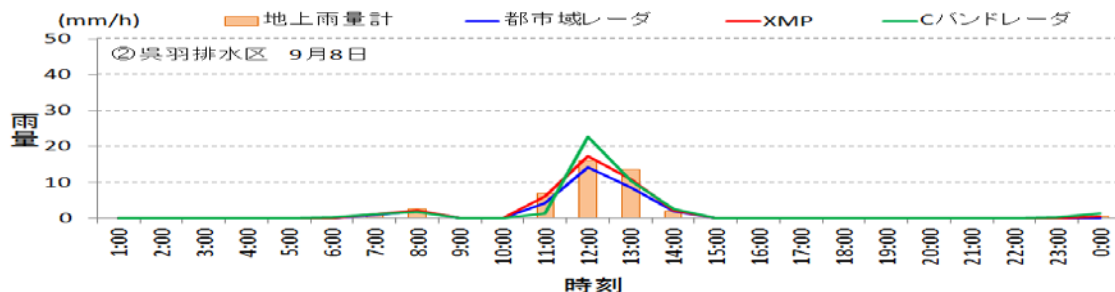
※ XMP 水橋局からの距離 約 33km



(d) 観測日：平成 28 年 9 月 8 日

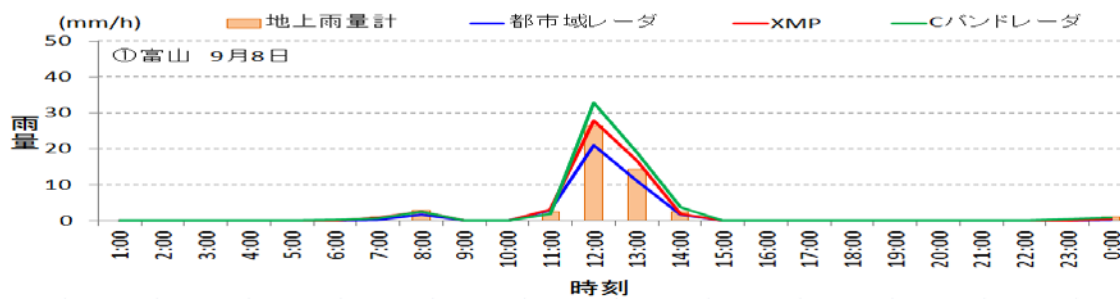
ア) 地上雨量計：②呉羽排水区（都市域レーダの観測範囲 ～約 10km）

※ XMP 水橋局からの距離 約 10km



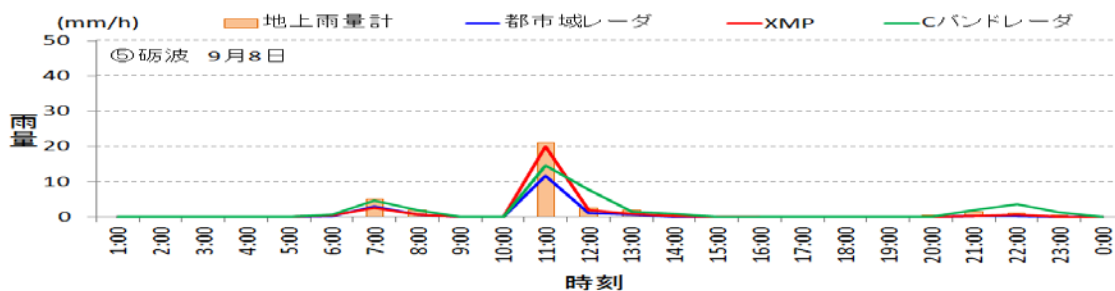
イ) 地上雨量計：①富山（都市域レーダの観測範囲 ～約 10km）

※ XMP 水橋局からの距離 約 7km



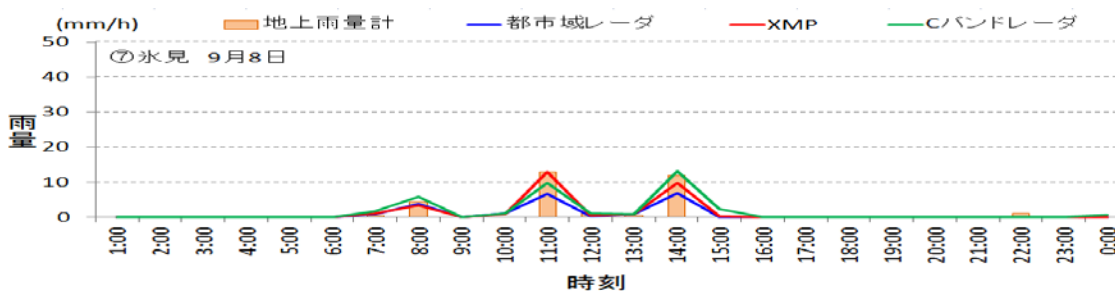
ウ) 地上雨量計：⑤砺波（都市域レーダの観測範囲 ～約 20km）

※ XMP 水橋局からの距離 約 30km



エ) 地上雨量計：⑦氷見（都市域レーダの観測範囲 ～約 30km）

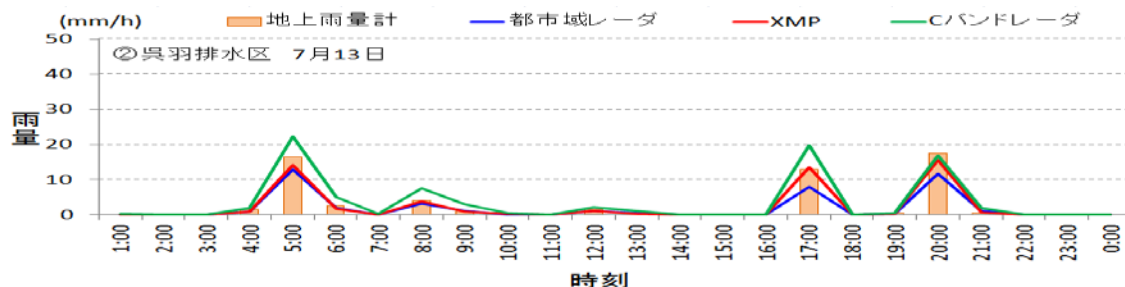
※ XMP 水橋局からの距離 約 33km



(e) 観測日：平成 28 年 7 月 13 日

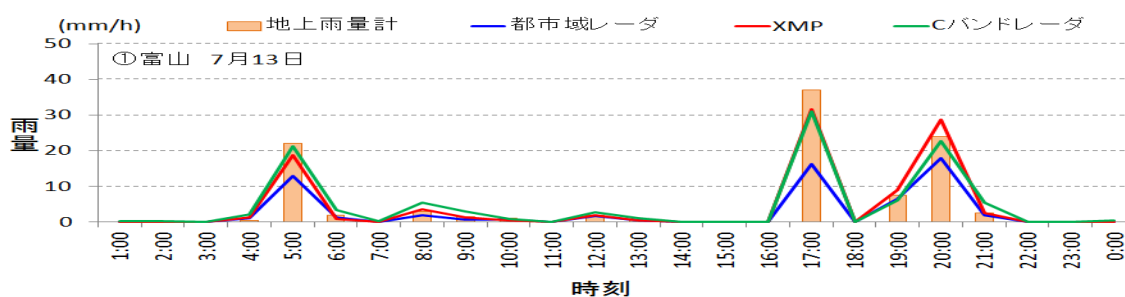
ア) 地上雨量計：②呉羽排水区（都市域レーダの観測範囲 ～約 10km）

※ XMP 水橋局からの距離 約 10km



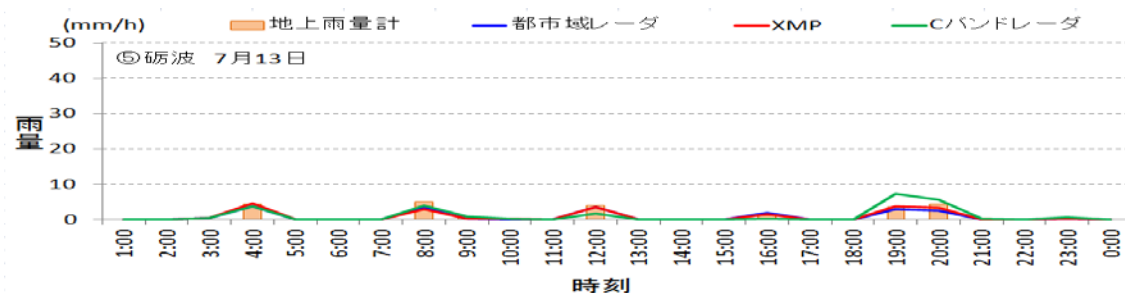
イ) 地上雨量計：①富山（都市域レーダの観測範囲 ～約 10km）

※ XMP 水橋局からの距離 約 7km



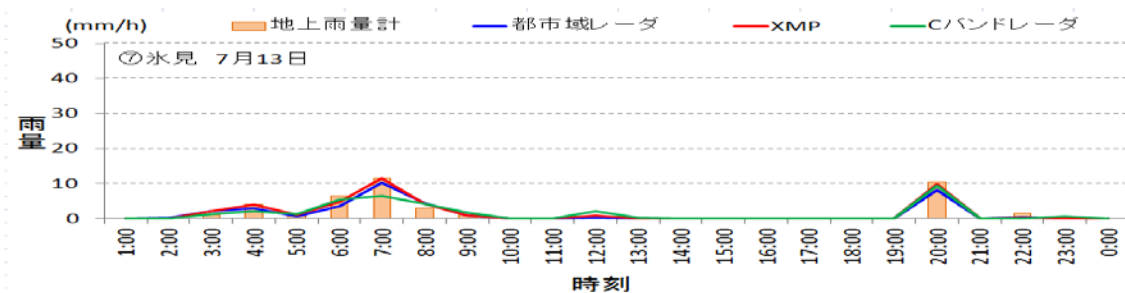
ウ) 地上雨量計：⑤砺波（都市域レーダの観測範囲 ～約 20km）

※ XMP 水橋局からの距離 約 30km



エ) 地上雨量計：⑦氷見（都市域レーダの観測範囲 ～約 30km）

※ XMP 水橋局からの距離 約 33km



3.3.4 信号減衰による欠測域の評価

(1) 評価方法

1) 目的

都市域レーダの高度 500m 観測領域において、都市域レーダの欠測域の確認および XMP の定量観測距離 60km 周辺地域である福井市において、XMP で欠測が発生した場合に都市域レーダで補完観測ができることの確認を目的に評価を行った。

2) 性能・目標

①欠測域率

福井市・富山市の都市域レーダの高度 500m 観測領域における欠測域率を 0%とした。

②欠測期間

都市域レーダの欠測期間が、XMP の欠測期間より短いこととした。

3) 評価手順

①欠測域率

都市域レーダの高度 500m 観測領域において、都市域レーダと XMP の観測可能域に対して発生した欠測域の面積の比較により評価した。

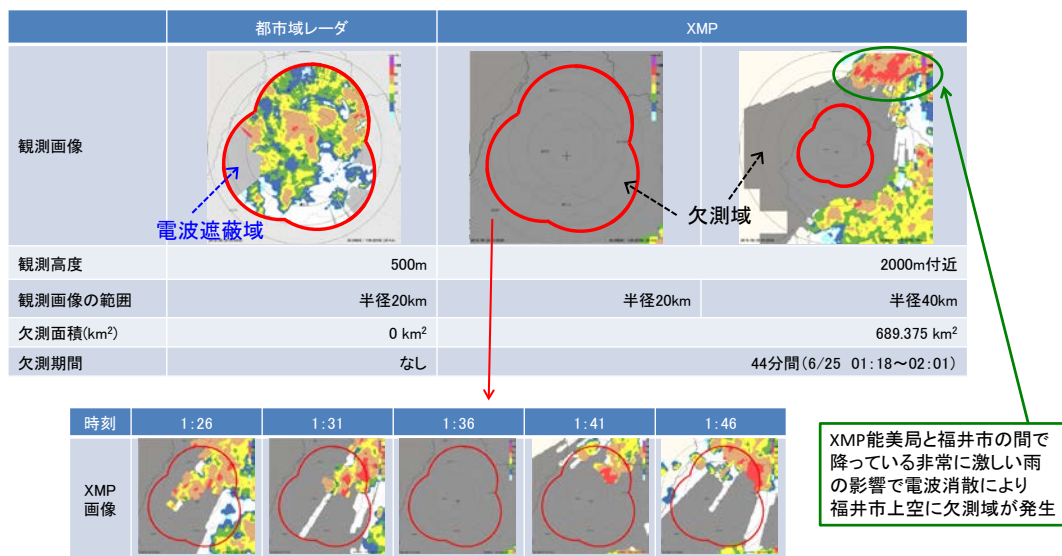
②欠測期間

都市域レーダの高度 500m 観測領域において、都市域レーダと XMP の観測可能域に対して発生した欠測期間の比較により評価した。

(2) 評価結果

福井市および富山市において、都市域レーダで欠測は発生しなかった。また、福井市における XMP の欠測期間は、1001 分間だった。XMP で欠測発生時に都市域レーダで観測できた事例を図 3-21 に示す。

福井市：XMP欠測発生時刻 平成28年6月25日 1時36分（XMPの欠測域の面積が最大となる時刻）



：福井市の下水道排水区域上空における都市域レーダ高度500mの観測領域

図 3-21 【事例】XMP の欠測（観測日：平成 28 年 6 月 25 日）

3.3.5 降雨観測精度向上

(1) 評価方法

1) 目的

実証研究における都市域レーダの降雨観測精度評価において、回帰係数が低いことを確認した。このため、降雨観測精度向上を目的に降雨量推定算出式およびレーダユニット3台の観測データの合成方法の検討および評価を行った。

2) 性能・目標

①回帰係数

XMPと比較して、同等またはそれ以上に近似性が高いこととした。

②相関係数

XMPと比較して、同等またはそれ以上に強い正の相関があることとした。

③RMSE

XMPと比較して、同等またはそれ以下に誤差が小さいこととした。

3) 評価手順

都市域レーダの降雨量推定算出式は、**図 3-22**の式1を使用しており、また、レーダユニット3台の観測データの合成方法は距離重み付け平均値法を使用しているが、降雨観測精度評価において回帰係数が低いため、**図 3-22**のXMPの算出式(式2)および最大値法(合成方法)を使用することで降雨観測精度向上の検討作業を実施した。

また、降雨観測精度向上の検討作業では、**表 2-1**に示すとおり、平成28年3月1日～11月30日の期間で、日総降雨量10mm以上を観測した降雨を対象に評価を行った。

なお、XMPの算出式および最大値法により算出した雨量データは、降雨観測精度向上の検討においてのみ使用しており、他の性能評価においては、**図 3-22**の式1の算出式および距離重み付け平均値法で算出した雨量データにて評価を行った。

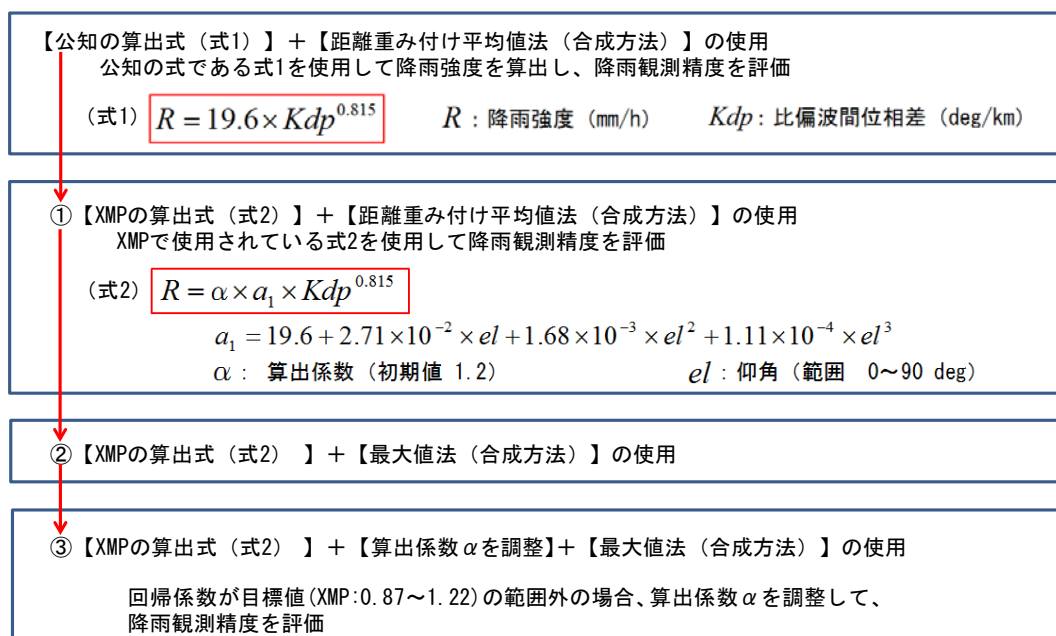


図 3-22 降雨観測精度向上検討手順

(2) 評価結果

XMP の算出式と最大値法を使用することで、回帰係数は、福井が 1.03 に、富山が 0.96 に大幅に改善した。降雨観測精度向上作業の各段階の評価結果を以下に示す。

1) XMP の算出式（式2）および距離重み付け平均値法（合成方法）の使用

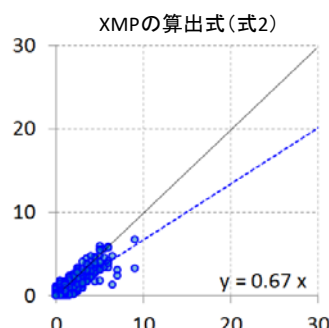
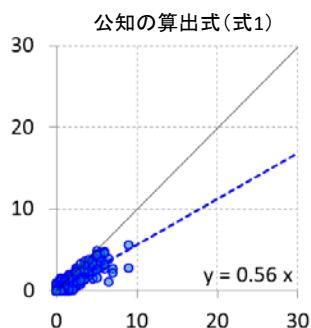
XMP の算出式を使用して降雨観測精度の検証を行った結果、公知の算出式に比べ回帰係数が向上した。

XMP の算出式を使用した場合の福井の降雨観測精度の評価結果を図 3-23 に、富山の降雨観測精度の評価結果を図 3-24 に示す。なお、評価ではレーダユニット 3 台中心位置から 10km 以内にある地上雨量計を用いた。

【福井】

地上雨量計：福井、第6排水区の2地点

縦軸：レーダ雨量
横軸：地上雨量計
単位：mm/10min



算出式種類	都市域レーダ		参考：XMP(※1)
	公知の算出式(式1)	XMPの算出式(式2)	
データ数(※2)	12096	12096	12096
評価指標	回帰係数	0.56	0.61
	相関係数	0.89	0.77
	RMSE	0.29	0.34

※1 能美局観測データ

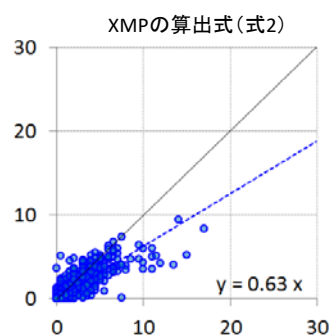
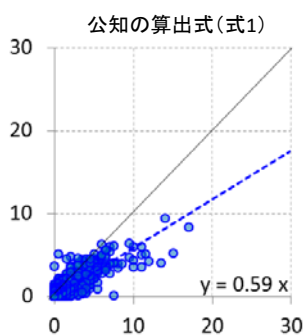
※2 10分間雨量データの同じ時刻において、地上雨量計とレーダ雨量計の両方に雨量値が存在するデータ数

図 3-23 (福井) XMP の算出式を使用

【富山】

地上雨量計：富山、呉羽排水区、秋ヶ島の3地点

縦軸：レーダ雨量
横軸：地上雨量計
単位：mm/10min



算出式種類	都市域レーダ		参考：XMP(※1)
	公知の算出式(式1)	XMPの算出式(式2)	
データ数(※2)	23328	23328	23328
評価指標	回帰係数	0.59	0.89
	相関係数	0.86	0.90
	RMSE	0.32	0.26

※1 水橋局と能美局の合成観測データ

※2 10分間雨量データの同じ時刻において、地上雨量計とレーダ雨量計の両方に雨量値が存在するデータ数

図 3-24 (富山) XMP の算出式を使用

2) XMP の算出式 (式 2) および最大値法 (合成方法) の使用

本実証研究運用時の合成方法である距離重み付け平均値法を最大値法の合成方法に見直し、降雨観測精度の検証を行った結果、回帰係数が大幅に向上した。最大値法を使用した場合の福井の降雨観測精度の検証結果を図 3-28 に、富山の降雨観測精度の検証結果を図 3-29 に示す。なお、本実証研究運用時の合成方法である平均処理および見直した合成方法である最大値法の詳細を以下に示す。

・本実証研究運用時の合成方法

⇒ 【距離重み付け平均値法】

各レーダユニットの観測データを距離による重み付け平均処理して雨量を算出する方法。

《メリット》

レーダ探知範囲の境界付近において、隣接レーダとの降水強度に不連続が生じにくい。

《デメリット》

豪雨による降雨減衰の影響を受けたレーダの雨量データがあると、雨量を低く算出してしまふ。降雨減衰により雨量を低く算出したレーダユニットの観測画像例とその時の 3 台合成画像例を図 3-25、図 3-26 に示す。

・見直した合成方法

⇒ 【最大値法】

レーダユニットの観測データの最大値を優先して雨量を算出する方法。

《メリット》

強い雨を確実に捉えることができる。

《デメリット》

レーダ探知範囲の境界付近において、隣接レーダとの降水強度に不連続が生じることがある。

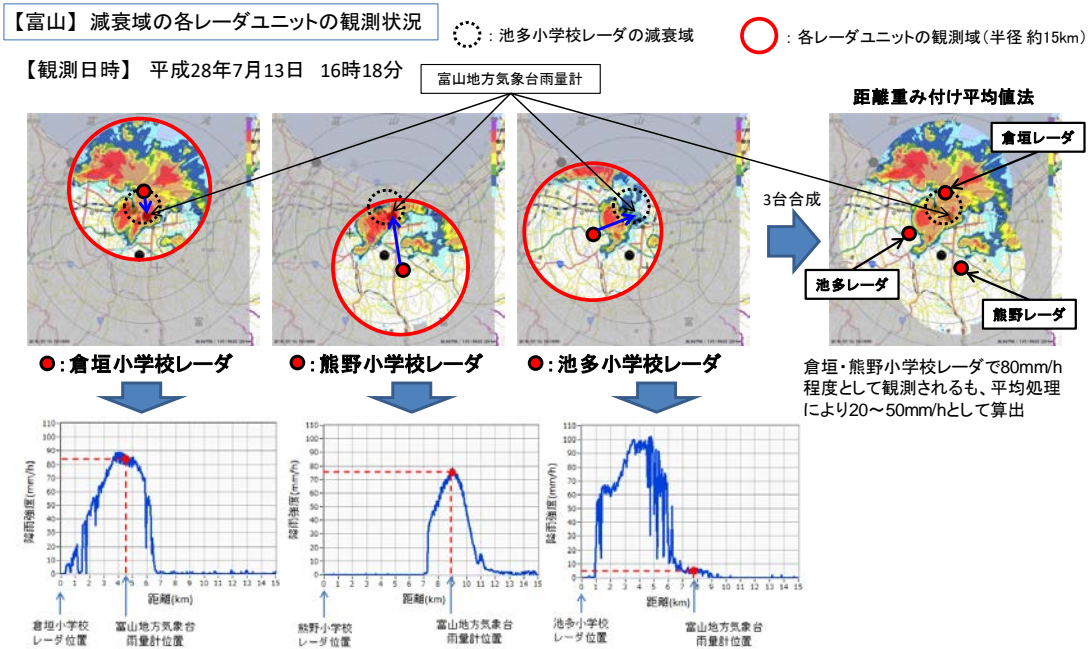


図 3-25 降雨減衰による観測画像例(富山 平成28年7月13日)

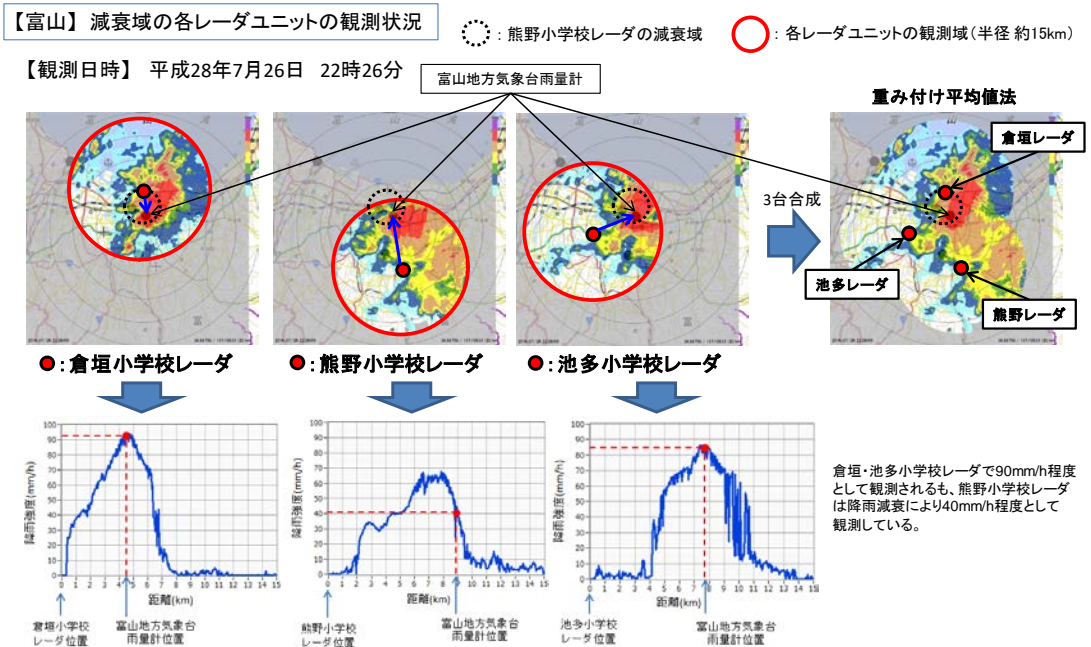



図 3-26 降雨減衰による観測画像例(富山 平成28年7月26日)

図 3-25 の池多小学校レーダおよび図 3-26 の熊野小学校レーダにおいて、受信電力が信号検出レベル以下になっていないため、欠測とはならなかったが、降雨減衰により雨量を低く算出していることがわかる。その結果、レーダユニット 3 台の合成雨量も低い値となるため、合成方法を各レーダユニットの観測データの最大値を優先して雨量を算出する最大値法にて降雨観測精度の検証を行った。

合成方法の違いによる観測画像の違いを図 3-27 に示す。中央の観測画像は最大値法により作成した観測画像で、左端の距離重み付け平均値法で作成した観測画像に比べて、降雨強度が高くなっている領域を確認することができる。

【富山】平成28年7月13日 16時23分の観測画像（XMPの算出式を使用）

下水道排水区域がある  の範囲において、最大値法が一番XMPに近い。

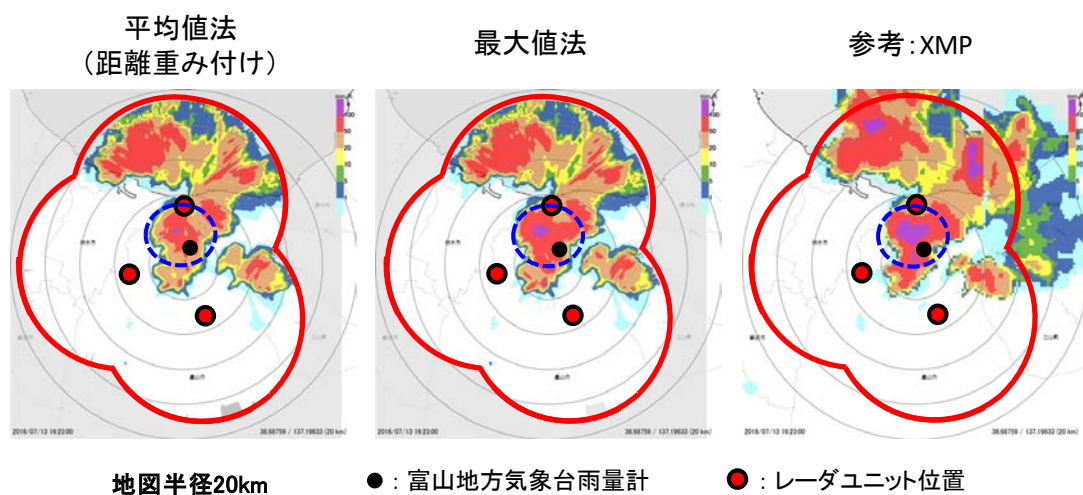
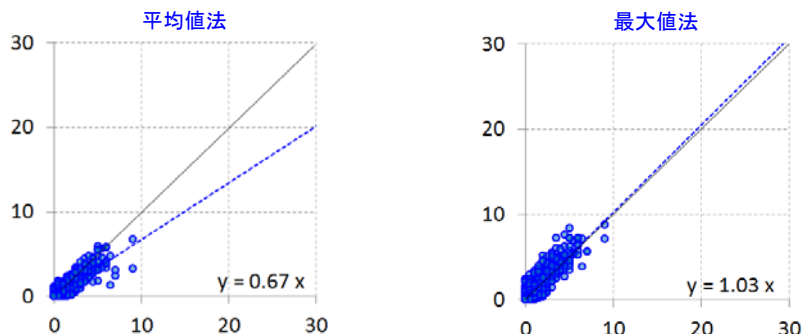


図 3-27 合成方法の違いによる観測画像の違い

【福井】

地上雨量計：福井、第6排水区の2地点

縦軸：レーダ雨量
横軸：地上雨量計
単位：mm/10min



合成方法		都市域レーダ		参考：XMP(※1)
		平均値法	最大値法	
データ数(※2)		12096	12096	12096
評価指標	回帰係数	0.67	1.03	0.61
	相関係数	0.89	0.90	0.77
	RMSE	0.26	0.27	0.34

※1 能美局観測データ

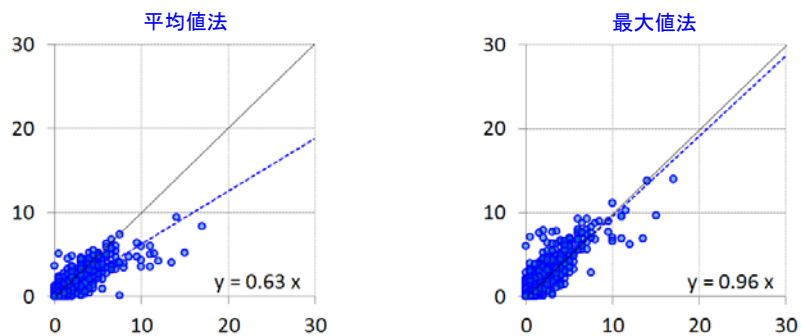
※2 10分間雨量データの同じ時刻において、地上雨量計とレーダ雨量計の両方に雨量値が存在するデータ数

図 3-28 (福井) 最大値法の合成方法により作成した散布図

【富山】

地上雨量計：富山、呉羽排水区、秋ヶ島の3地点

縦軸：レーダ雨量
横軸：地上雨量計
単位：mm/10min



合成方法		都市域レーダ		参考：XMP(※1)
		平均値法	最大値法	
データ数(※2)		23328	23328	23328
評価指標	回帰係数	0.63	0.96	0.89
	相関係数	0.85	0.88	0.90
	RMSE	0.31	0.30	0.26

※1 水橋局と能美局の合成観測データ

※2 10分間雨量データの同じ時刻において、地上雨量計とレーダ雨量計の両方に雨量値が存在するデータ数

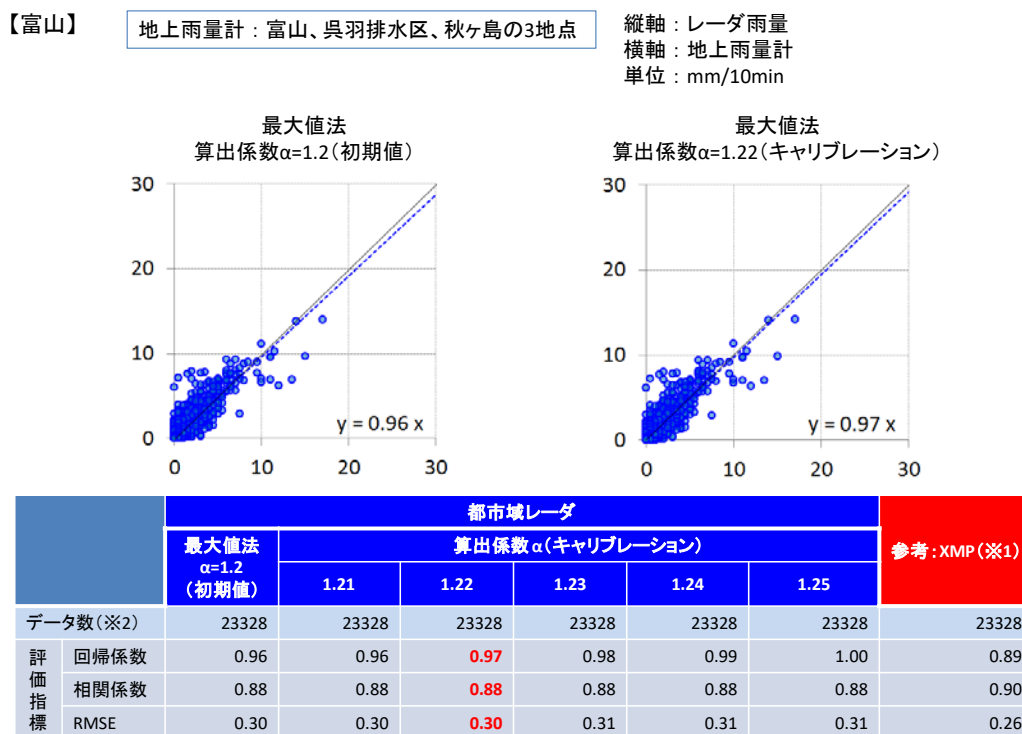
図 3-29 (富山) 最大値法の合成方法により作成した散布図

3) 算出係数 α の調整 (キャリブレーション)

降雨観測精度の評価指標において、回帰係数が目標値(XMP:0.87~1.22)の範囲外の場合、XMPの算出式(式2)の算出係数 α を調整して、回帰係数が1に近づくようキャリブレーションを実施する。ただし、回帰係数を1に近づけることで相関係数およびRMSEの値がキャリブレーション前に比べて悪化する場合は、悪化が最小限に留まるような算出係数を設定し、回帰係数を目標値(XMP:0.87~1.22)の範囲に収まるようキャリブレーションを実施する。

今回、キャリブレーション例として、最大値法で合成処理した結果、回帰係数が0.96となった富山においてキャリブレーションを実施した。

図3-30に示すとおり、算出係数 α が1.22の時に、相関係数およびRMSEが悪化せず、回帰係数が0.97に向上した。



※1 水橋局と能美局の合成観測データ

※2 10分間雨量データの同じ時刻において、地上雨量計とレーダ雨量計の両方に雨量値が存在するデータ数

図 3-30 (富山) キャリブレーション結果

3.3.6 距離分解能の違いによる降雨観測精度比較評価

(1) 評価方法

1) 目的

今後予定されている電波法関係法令改正により小型気象レーダの実用局としての免許を受けることが可能となる見込みである。ただし、占有周波数帯幅が限定されたため、距離分解能の変更（50m→75m）が必要である。距離分解能の変更作業を平成28年11月30日に実施し、12月1日より距離分解能75mで観測している。そこで、距離分解能75mの降雨観測精度確認を目的に距離分解能75mと50mの違いによる降雨観測精度の比較評価を行った。

なお、評価期間中に、規模の小さい降雨しか観測できなかったため、規模の大きな降雨を用いた距離分解能75mと50mとの観測精度の比較評価が課題として残る。

2) 性能・目標

①相関係数

距離分解能50mと比較して、距離分解能75mが同等であることとした。

②RMSE

距離分解能50mと比較して、距離分解能75mが同等であることとした。

3) 評価手順

①評価降雨選定

平成28年12月1日～12月31日の全降雨を対象に評価を行った。距離分解能75mの降雨観測状況一覧を表3-6に示す。ただし、雪を観測した日を除く（福井、富山ともに12/16が雪）。比較する距離分解能50mの降雨については、平成28年3月1日～11月30日の期間で、距離分解能75mの降雨と同規模程度の降雨を選定し、それぞれの降雨強度分布を示した図3-31により実際に同規模程度の降雨であるか確認した。その結果、データの分布（データ数の割合）が同じ形状のため、同規模程度の降雨であることを確認した。

表 3-6 距離分解能 75m の降雨観測状況一覧表

【福井】 距離分解能75m					【富山】 距離分解能75m				
No.	観測日	総雨量 (mm/日)	1時間最大雨量 (mm/h)	10分最大雨量 (mm/10min)	No.	観測日	総雨量 (mm/日)	1時間最大雨量 (mm/h)	10分最大雨量 (mm/10min)
1	2016/12/22	23.9	5.7	3.1	1	2016/12/27	65.5	12.3	2.5
2	2016/12/14	17.6	8.5	2.2	2	2016/12/8	11.8	5.4	1.7
3	2016/12/6	8.9	2.2	2.0	3	2016/12/29	18.0	6.4	1.5
4	2016/12/24	12.9	3.9	1.9	4	2016/12/10	9.8	3.2	1.5
5	2016/12/29	24.2	6.2	1.8	5	2016/12/17	24.6	4.9	1.4
6	2016/12/9	16.5	3.0	1.6	6	2016/12/6	9.3	2.4	1.4
7	2016/12/27	36.0	7.7	1.5	7	2016/12/9	12.9	2.2	1.4
8	2016/12/13	30.2	6.8	1.4	8	2016/12/13	20.4	5.3	1.3
9	2016/12/7	13.8	3.0	1.4	9	2016/12/14	23.4	3.7	1.3
10	2016/12/1	8.7	2.1	1.4	10	2016/12/7	3.3	1.4	1.2
11	2016/12/8	6.5	2.3	1.3	11	2016/12/22	9.9	4.6	1.1
12	2016/12/17	13.0	2.5	1.2	12	2016/12/23	7.2	1.9	1.1
13	2016/12/23	14.9	2.3	1.2	13	2016/12/1	5.6	1.3	0.9
14	2016/12/10	3.5	1.3	1.2	14	2016/12/24	3.8	2.3	0.8
15	2016/12/4	4.4	1.9	0.7	15	2016/12/11	6.6	1.4	0.6
16	2016/12/30	2.5	1.3	0.6	16	2016/12/15	3.4	1.1	0.5
17	2016/12/28	4.5	1.1	0.4	17	2016/12/26	2.8	0.6	0.2
18	2016/12/31	0.9	0.4	0.4	18	2016/12/28	0.8	0.4	0.2
19	2016/12/5	2.3	1.0	0.3	19	2016/12/30	1.5	0.7	0.1
20	2016/12/11	1.6	0.4	0.3	20	2016/12/5	0.9	0.4	0.1
21	2016/12/15	0.5	0.3	0.1					
22	2016/12/26	0.9	0.3	0.1					

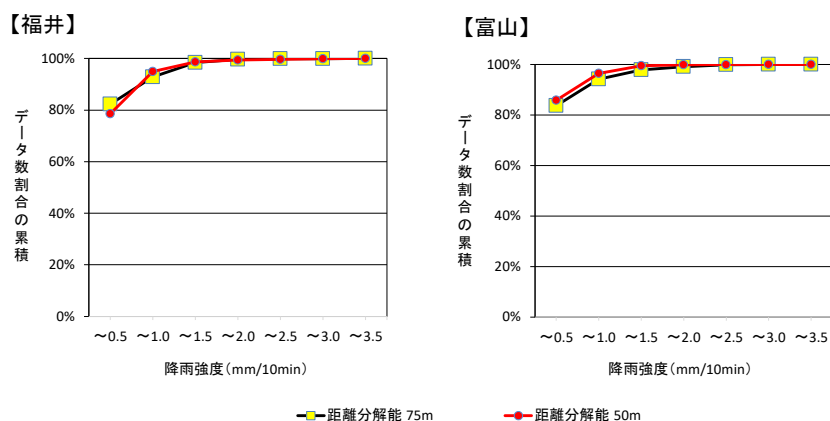


図 3-31 距離分解能毎の降雨強度分布

② 散布図による降雨観測精度比較

レーダユニット 3 台中心位置から 10km 以内に位置する地上雨量計とレーダ雨量をそれぞれ 10 分雨量で比較し、相関係数および RMSE の値で評価を行った。

③ ハイエトグラフによる降雨観測精度比較

下水道排水区域内に位置する地方気象台地上雨量計とレーダ雨量をそれぞれ 1 時間雨量で比較し、評価する。

なお、本実証研究においては、表 3-6 に示す 1 時間最大雨量の上位 5 降雨（黄色部分）で評価を行った。

(2) 評価結果

1) 散布図による降雨観測精度評価

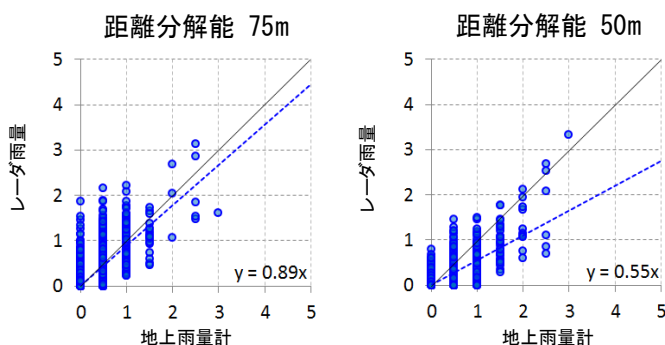
福井・富山ともに、相関係数およびRMSEの値は距離分解能50mと同等であった。よって、距離分解能75mの降雨観測精度は、距離分解能50mと同等であることが確認できた。

福井については、表3-4の降雨観測状況一覧の降雨を対象に距離分解能75mと50mの精度比較結果を図3-32に示す。

富山については、表3-5の降雨観測状況一覧の降雨を対象に距離分解能75mと50mの精度比較結果を図3-33に示す。

【福井】地上雨量計(①福井、②第六排水区)

雨量単位: mm/10min



算出式 合成方法	公知の算出式 平均値法
検証に 用いた 降雨	<距離分解能75m> 平成28年12月1日～ 12月31日 降雨観測日(22日間) (平成28年12月16日は 雪のため除外)
	<距離分解能50m> 平成28年3月1日～ 11月30日 同降雨強度の観測日 (22日間)
降雨強度 範囲	地上雨量計で 0～3.0 mm/10min

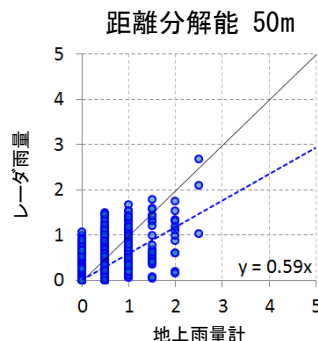
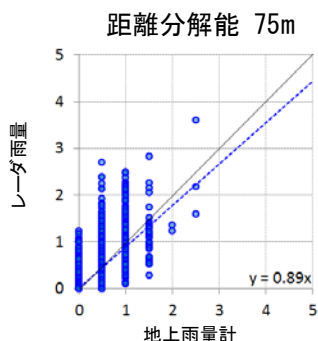
距離分解能		75m	50m
データ数(※)		6336	6336
評価指標	回帰係数	0.89	0.55
	相関係数	0.76	0.77
	RMSE	0.17	0.15

※ 10分間雨量データの同じ時刻において、地上雨量計とレーダ雨量計の両方に雨量値が存在するデータ数

図 3-32 (福井) 散布図による降雨観測精度比較

【富山】地上雨量計(①富山、②呉羽排水区、③秋ヶ島)

雨量単位: mm/10min



算出式 合成方法	公知の算出式 平均値法
検証に 用いた 降雨	<距離分解能75m> 平成28年12月1日～ 12月31日 降雨観測日(20日間) (平成28年12月16日は 雪のため除外)
	<距離分解能50m> 平成28年3月1日～ 11月30日 同降雨強度の観測日 (20日間)
降雨強度 範囲	地上雨量計で 0～2.5 mm/10min

距離分解能	75m	50m	
データ数(※)	8622(注)	8640	
評価指標	回帰係数	0.89	0.59
	相関係数	0.73	0.72
	RMSE	0.17	0.15

(注)地上雨量計(秋ヶ島)で
平成28年12月1日
21:10～24:00 欠測

※ 10分間雨量データの同じ時刻において、地上雨量計とレーダ雨量計の両方に雨量値が存在するデータ数

図 3-33 (富山) 散布図による降雨観測精度比較

2) ハイエトグラフによる降雨観測精度評価

福井・富山ともに、雨の降り始め、ピーク、雨が止むタイミングなど地上雨量計と相関がとれており、距離分解能 75m の降雨観測に問題ないことが確認できた。

3.4 レーダ雨量解析技術の特徴と性能評価

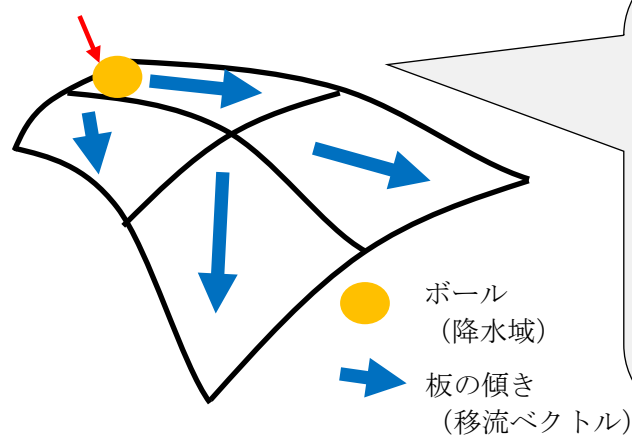
3.4.1 降雨予測モデルの理論

(1) 移流モデルの概念

1) 移流モデルの概要

移流モデルは、レーダ観測やアメダス等の雨量計データから求めた降水の強さの分布および降水域の発達や衰弱の傾向、降水域の移動を利用し、運動学的に降雨を予測するものである。気象庁では、降水ナウキャスト等の短時間降雨予測に活用している。図 3-34 に移流モデルの概念を、図 3-35 に気象庁における移流モデルの活用例を示す。次頁以降に移流モデルの基礎理論式を示す。

板の傾きから将来のボールの動きを予測



移流モデルを概念的に示すと、ボールのようなものに見立てた降雨域が板の上を動いているとして、その板の傾き(移流ベクトル)を推測することで、将来のボールの動きを予測する手法である。板の傾きは、過去の板の傾きと現在のボールの位置から推定されるので、少しのずれがおきたりする。これが予測誤差の要因であり、移流モデルでは、これを考慮することができない。

図 3-34 移流モデルの概念

- ・ 降水ナウキャスト：1時間先までの5分毎の降水の強さを予報



図 3-35 気象庁における移流モデルの活用例

出典：気象庁 HP <http://www.jma.go.jp/jp/radnowc/>

2) 移流モデルの基礎理論式

移流モデルは以下の式で表現される。

$$\frac{\partial z}{\partial t} + u \frac{\partial z}{\partial x} + v \frac{\partial z}{\partial y} = w \quad (3.1)$$

ここに、Z：降雨強度，t：時間，x：x成分，y：y成分，

u：移流ベクトルのx方向成分，v：移流ベクトルのy方向成分

w：発達・衰弱項

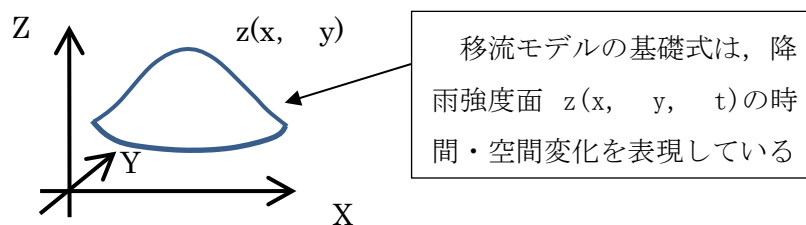


図 3-36 移流モデル基礎式のイメージ

地上の点(x, y)における時刻tの降雨強度がzであるとき、曲面 $z=z(x, y, t)$ を降雨強度面と呼ぶ。移流モデルでは、この降雨強度面を移流ベクトル(u, v)と発達・衰弱項wによって変化させることにより降雨強度時空間分布データを外挿している。

以下、直原，中北の論文を一部引用しながら移流モデルについて概説する。

移流モデルの式(3.1)における移流ベクトル(u, v)，発達・衰弱項wは、平行移動に限らない雨域の変動を捉えられるようにするため、また線形最小二乗推定問題として定式化できるようにするために、これらを位置座標の一次式

$$u = c_1x + c_2y + c_3 \quad (3.2)$$

$$v = c_4x + c_5y + c_6 \quad (3.3)$$

$$w = c_7x + c_8y + c_9 \quad (3.4)$$

としている。ここで、 $c_1 \sim c_9$ は推定されるべきパラメータである。これらの式より、雨域の角速度 ω_{xy} ，せん断ひずみ速度 γ_{xy} ，x軸方向のひずみ速度 e_x ，y軸方向のひずみ速度 e_y は

$$\omega_{xy} = (-c_2 + c_4)/2 \quad (3.5)$$

$$\gamma_{xy} = c_2 + c_4 \quad (3.6)$$

$$e_x = c_1 \quad (3.7)$$

$$e_y = c_5 \quad (3.8)$$

として与えられる。もちろん、実際の雨域の移動は式(3.1)から式(3.4)で表現されるよりも複雑であるが、これ以上の雨域の変動を考慮に入れることはパラメータの同定・予測に必要な計算時間を増大させるだけで、実時間予測という観点からは好ましくない。

3) パラメータの同定

気象観測用レーダの観測範囲を網羅するような長方形領域をとり、それを Δx , Δy のメッシュ区画に分割する。このとき、

$$x_i = \left(i - \frac{1}{2}\right) \Delta x, \quad i = 1, \dots, M \quad (3.9)$$

$$y_j = \left(j - \frac{1}{2}\right) \Delta y, \quad j = 1, \dots, N \quad (3.10)$$

$$t_k = k\Delta t, \quad k = 0, \dots, -k-1 \quad (3.11)$$

とする。ただし、 Δt はデータの時間間隔、 M および N はそれぞれ x 方向、 y 方向のメッシュ区画数、 $(k+1)\Delta t$ はパラメータ同定に使用する過去のデータの長さである。座標 (x_i, y_j) は元の長方形領域の左から i 行 j 列目のメッシュ区画の中心点の座標である。

点 (x_i, y_j) 、時刻 t_k の偏微分を

$$\left(\frac{\partial z}{\partial t}\right)_{ijk} = \frac{z(x_i, y_j, t_{k+1}) - z(x_i, y_j, t_{k-1})}{2\Delta t} \quad (3.12)$$

$$\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)_{ijk} = \frac{z(x_{i+1}, y_j, t_k) - z(x_{i-1}, y_j, t_k)}{2\Delta x} \quad (3.13)$$

$$\left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)_{ijk} = \frac{z(x_i, y_{j+1}, t_k) - z(x_i, y_{j-1}, t_k)}{2\Delta y} \quad (3.14)$$

のように近似し、

$$v_{ijk} = -\left(\frac{\partial z}{\partial t}\right)_{ijk} - \left\{ (c_1 x_i + c_2 y_j + c_3) \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)_{ijk} + (c_4 x_i + c_5 y_j + c_6) \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)_{ijk} - (c_7 x_i + c_8 y_j + c_9) \right\} \quad (3.15)$$

とおく。パラメータ $c_1 \sim c_9$ が正しく同定されれば、 v_{ijk} は0（ゼロ）となるべきものである。したがって、

$$J_c = \sum_{k=-K}^{-1} \sum_{i=2}^{M-1} \sum_{j=2}^{N-1} v_{ijk}^2 \quad (3.16)$$

を最小にするように $c_1 \sim c_9$ を推定する。

実際には重回帰分析の重回帰式は式(3.15)を変形して

$$a_{ijk}^1 c_1 + a_{ijk}^2 c_2 + \cdots + a_{ijk}^9 c_9 = b_{ijk} - v_{ijk} \quad (3.17)$$

となる。ただし,

$$a_{ijk}^1 = x_i \left[\frac{\partial z}{\partial x} \right]_{ijk} \quad (3.18)$$

$$a_{ijk}^2 = y_j \left[\frac{\partial z}{\partial x} \right]_{ijk} \quad (3.19)$$

$$a_{ijk}^3 = \left[\frac{\partial z}{\partial x} \right]_{ijk} \quad (3.20)$$

$$a_{ijk}^4 = x_i \left[\frac{\partial z}{\partial y} \right]_{ijk} \quad (3.21)$$

$$a_{ijk}^5 = y_j \left[\frac{\partial z}{\partial y} \right]_{ijk} \quad (3.22)$$

$$a_{ijk}^6 = \left[\frac{\partial z}{\partial y} \right]_{ijk} \quad (3.23)$$

$$a_{ijk}^7 = -x_i \quad (3.24)$$

$$a_{ijk}^8 = -y_j \quad (3.25)$$

$$a_{ijk}^9 = -1 \quad (3.26)$$

$$b_{ijk} = - \left[\frac{\partial z}{\partial t} \right]_{ijk} \quad (3.27)$$

の形で考える。ここで、 $a_{ijk}^1, \dots, a_{ijk}^9, b_{ijk}$ はメッシュごとに決まる定数となる。

(2) 特異移流モデルの概念

1) 特異移流モデルの概要

降雨予測の誤差の原因は、初期値に含まれる誤差が拡大することに起因し、その誤差は時間の経過とともに拡大し、大きな誤差へと発展する。観測データの誤差や解析手法の限界から、初期値に含まれる誤差をゼロにすることはできず、時間とともに誤差が拡大することは避けることはできない。

そこで、このような誤差の拡大を事前に把握するため、少しずつ異なる初期値を多数用意するなどして多数の予測を行う「特異移流モデル」を用いる。本モデルからは複数の予測が求められるので、その平均やばらつきの程度といった統計的な性質を利用して最も起こりやすい現象の予測ができる。気象庁では、台風進路予報や季節予報等のため、数値予報に「アンサンブル（集団）予報」の手法を用いている。

本実証の特異移流モデルは、移流モデルの基礎式を用いて、初期値に複数の観測誤差を与えることにより、複数パターン of 予測値を算出するモデルであり、誤差の広がりが大きければ、最も大きな雨に備えた対策（安全側対策）を採用することを可能とする。これらは比較的小さな流域を扱う場合に適しており、実証フィールドに適用して浸水予測まで行うのはこれまでになく、実証研究の独自の試みである。

なお、複数の予測から安全側の予測を採用することについては、一方で予測情報の空振りが増えやすくなる可能性もあることから、目的に応じた予測を用いるなどの留意が必要である。

図 3-37 に特異移流モデルの予測算出フローを、図 3-38 に気象庁におけるアンサンブル予報の活用例を示す。

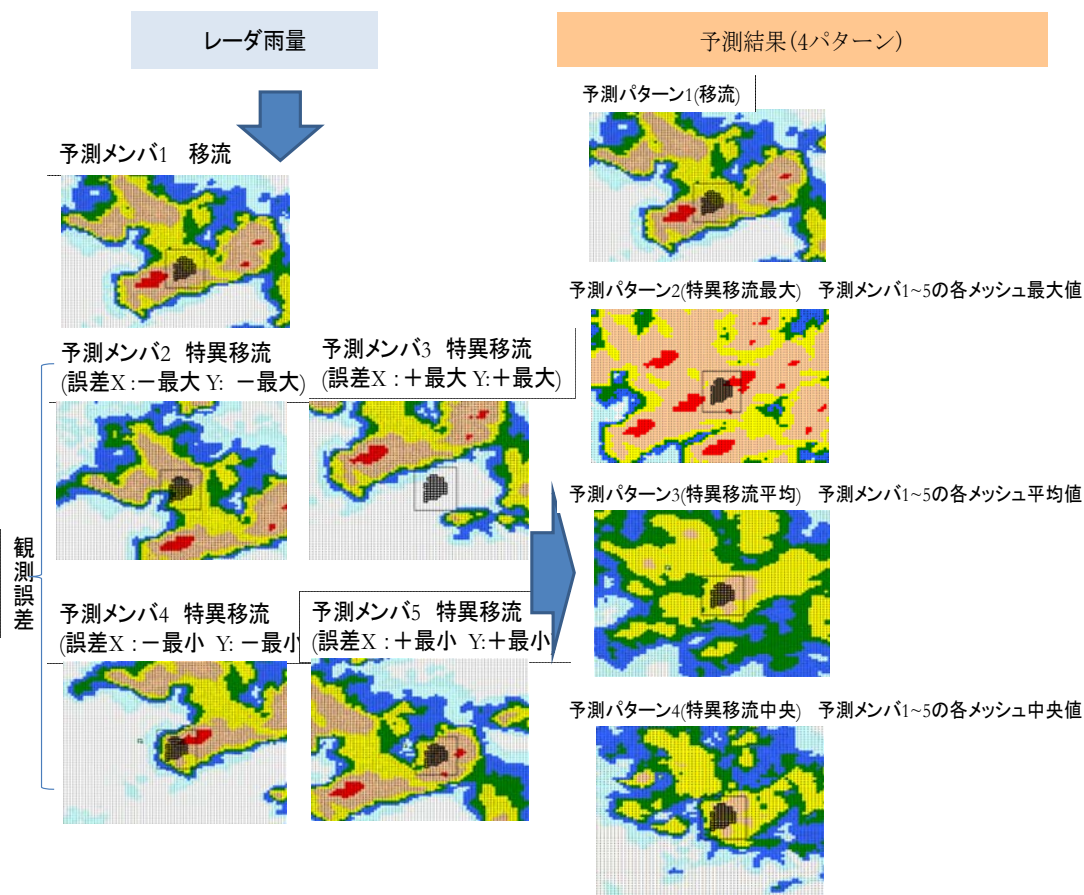


図 3-37 特異移流モデルの予測算出フロー

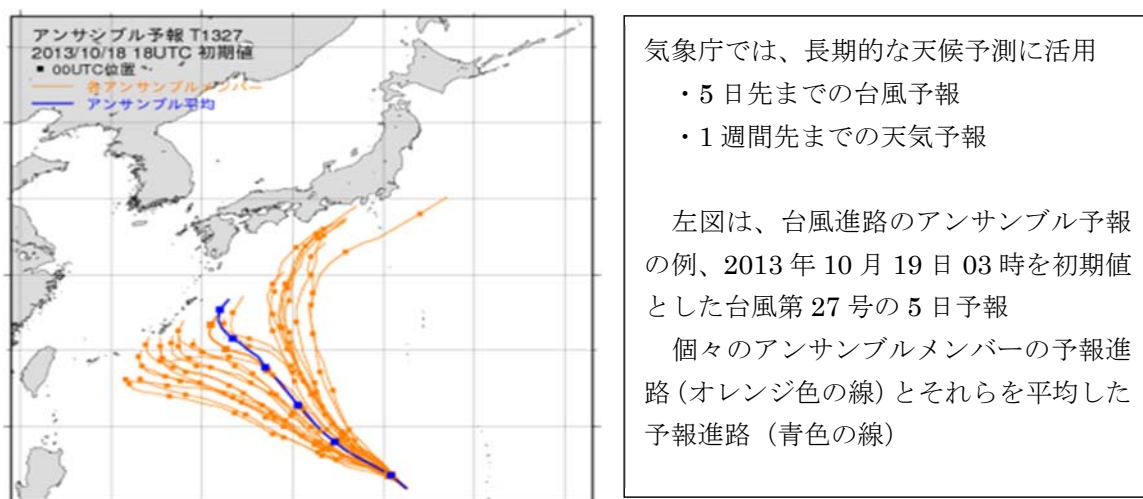


図 3-38 気象庁におけるアンサンブル予報の活用例

出典：気象庁 HP <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>

2) 特異移流モデルの基礎理論式

特異移流モデルは、以下の式で表現される。

$$u = \frac{d(x \pm \delta_x)}{dt} = c_1(x \pm \delta_x) + c_2(y \pm \delta_y) + c_3 \quad (3.28)$$

$$v = \frac{d(y \pm \delta_y)}{dt} = c_4(x \pm \delta_x) + c_5(y \pm \delta_y) + c_6 \quad (3.29)$$

ここに、 Z : 降雨強度, t : 時間, x : x 成分, y : y 成分,

u : 移流ベクトルの x 方向成分, v : 移流ベクトルの y 方向成分

w : 発達・衰弱項

δx : 移流ベクトルの初期摂動 x 方向成分

δy : 移流ベクトルの初期摂動 y 方向成分

3) 初期摂動の算出方法

① 初期特異ベクトル m_1, m_2 の算出

移流モデルにおける特異ベクトルの定義およびその求め方を以下に示す。移流モデルでは移流ベクトル u, v および発達衰弱項 w が位置の座標 (x, y) を用いて式 (3.2) から式 (3.4) のように表される。特異ベクトル法は移流ベクトル u, v の摂動を分析する際に使用する。式 (3.2) および式 (3.3) より 2 次元ヤコビアン行列 \mathbf{J} は

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1 & c_2 \\ c_3 & c_4 \end{pmatrix} \quad (3.30)$$

となり、パラメータ $c_1 \sim c_9$ が同定されると \mathbf{J} は容易に求められる。

ここでヤコビアン行列 \mathbf{J} の固有ベクトル $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$ を用いて固有ベクトル行列 $\mathbf{P} = (\mathbf{p}_1 \ \mathbf{p}_2)$ とすると、誤差行列 \mathbf{L} はヤコビアン行列 \mathbf{J} およびヤコビアン行列 \mathbf{J} の固有値 λ_1, λ_2 , 固有ベクトル行列 \mathbf{P} により次のように定義される。

$$\mathbf{L} = \mathbf{P} \mathbf{e}^{\tau \mathbf{J}} \mathbf{P}^{-1} = \mathbf{P} \begin{pmatrix} e^{3\lambda_1} & 0 \\ 0 & e^{3\lambda_2} \end{pmatrix} \mathbf{P}^{-1} \quad (3.31)$$

τ は特異ベクトルが線形的に増幅すると仮定される時間であり、Ratih Indri Hapsari の論文に倣い $\tau = 3$ [hour] とした。

ここで誤差行列 \mathbf{L} の転置行列を \mathbf{L}^T と表記し、 $\mathbf{L} \mathbf{L}^T$ を前方スキーム (forward scheme), $\mathbf{L}^T \mathbf{L}$ を後方スキーム (backward scheme) と呼ぶ。初期摂動の作成に用いる初期特異ベクトル行列 \mathbf{M} は、この前方スキームの固有値 σ_1^1, σ_2^1 の固有ベクトル $\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2$ より

$$\mathbf{M} = (\mathbf{m}_1 \quad \mathbf{m}_2) \quad (3.32)$$

となる。ここで、初期特異ベクトル行列 \mathbf{M} のノルムが1となるように固有ベクトル \mathbf{m}_1 , \mathbf{m}_2 の値を調整しておく（なお、この後に得られる最終特異ベクトル行列 \mathbf{N} も同様にする）。

一方、後方特異ベクトルの固有値 σ_1^2 , σ_2^2 からそれぞれ求められた固有ベクトル \mathbf{n}_1 , \mathbf{n}_2 は最終特異ベクトル行列

$$\mathbf{N} = (\mathbf{n}_1 \quad \mathbf{n}_2) \quad (3.33)$$

を成す。最終特異ベクトル行列 \mathbf{N} は、初期特異ベクトル行列が発展した3時間後の結果となっている。

②初期摂動の算出

初期特異ベクトル \mathbf{m}_1 , \mathbf{m}_2 を用いて初期の誤差（摂動）を作成する。作成手順は以下の通り。

(a)時刻 $t = \Delta t$ の予測結果を得る。

(b)手順(a)で得られた時刻 $t = \Delta t$ の予測結果を現在時刻 $t = 0$ の降雨強度分布、時刻 $t = \Delta t$ に観測された降雨強度分布を $t = -\Delta t$ の降雨強度分布として移流モデルに入力し、改めてパラメータ同定を行う。ここではパラメータ $c_7 \sim c_9$ はあらかじめ0（ゼロ）としておく。

(c)手順(b)で同定されたパラメータを用い、格子点ごとに式(3.2), 式(3.3)から移流ベクトルを算出する。

(d)限られた範囲（対象流域、都市域など）の x 方向成分 u , y 方向成分 v のそれぞれの平均値を誤差ベクトル \mathbf{u}_{error} , \mathbf{v}_{error} とする

(e)次の手順で誤差ベクトル \mathbf{u}_{error} , \mathbf{v}_{error} から位置ベクトルを求める。

Step1: 手順②で同定されたパラメータ c_3 , c_6 を誤差ベクトル \mathbf{u}_{error} , \mathbf{v}_{error} からそれぞれ

引いたものを $\begin{pmatrix} \mathbf{u}_{error} \\ \mathbf{v}_{error} \end{pmatrix}_{process}$ とする。

$$\begin{pmatrix} u_{error} \\ v_{error} \end{pmatrix}_{process} = \begin{pmatrix} u_{error} \\ v_{error} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} c_3 \\ c_6 \end{pmatrix} \quad (3.34)$$

Step2 : $\begin{pmatrix} u_{error} \\ v_{error} \end{pmatrix}_{process}$ と手順②で同定されたパラメータ $c_1 \sim c_6$ から以下の式により誤差の

位置ベクトル $\begin{pmatrix} e_x \\ e_y \end{pmatrix}$ を求める。

$$\begin{pmatrix} e_x \\ e_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1 & c_2 \\ c_4 & c_5 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} u_{error} \\ v_{error} \end{pmatrix}_{process} \quad (3.35)$$

(f) 前方スキームから求められた初期特異ベクトル $\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2$ を手順(e)で得られた誤差の位置ベクトルの長さに合わせる (スケーリング)。

$$\text{scaled Singular Vector} = \boldsymbol{\delta}(\delta_x, \delta_y) = \frac{\Delta t \sqrt{e_x^2 + e_y^2}}{\|\mathbf{m}_i\|} \mathbf{m}_i, \quad (i = 1, 2) \quad (3.36)$$

(g) スケーリングした初期特異ベクトルを移流ベクトルの式, 式(3.2), 式(3.3)の位置座標 (x, y) に足し引きし, 初期摂動を得る。

$$u = \frac{d(x \pm \delta_x)}{dt} = c_1(x \pm \delta_x) + c_2(y \pm \delta_y) + c_3 \quad (3.37)$$

$$v = \frac{d(y \pm \delta_y)}{dt} = c_4(x \pm \delta_x) + c_5(y \pm \delta_y) + c_6 \quad (3.38)$$

4) 予測パターンの概要および特性

移流モデル、特異移流モデルの予測パターンの概要および特性について表 3-7 に示す。

表 3-7 予測パターンの概要および特性

予測パターン		予測値の概要	予測雨量の特性		適用性 ^{※1}	
			メリット	デメリット	施設 運転 支援	自助 共助 支援
移流モデル		誤差を考慮しない1メンバーのみの予測値。	予測誤差が小さく、適切な施設運転支援情報の提供が可能。	予測誤差がマイナスになることがあり、その誤差を考慮して基準水位等を設定する必要がある。	○	△
特異 移流 モデル	平均 中央	5メンバーの予測のうち、各メッシュの平均・中央値を採用。	同上	同上	○	△
	最大	5メンバーの予測のうち、各メッシュの最大値を採用。	予測誤差がプラスになり、自助・共助支援において見逃しの無い安全側の予測が可能。	予測誤差がプラスになり、自助・共助支援において空振りが多くなる。	△	○

○：適用性が高い，△：適用性が低い

※1 実証技術では、適用性の判断基準として以下の通り設定した。

- 施設運転支援

適切な施設運転支援を可能とすることを目標とし、誤差が小さい予測パターンを選定した。

- 自助・共助支援

見逃しの無い安全側の予測が可能であり、自助・共助におけるリードタイムを確保可能であることを目標とし、誤差がプラスとなる予測パターンを選定した。

3.4.2 降雨予測手順

(1) 移流モデルの予測手順

1) 降雨観測データの読み込み

降雨観測値（レーダ観測値）を読み込む。

2) パラメータ C1～C9 の設定

回帰式（移流モデルの基礎式より）より、観測データから格子点毎に求められる定数 C1～C9 を設定する。

表 3-8 パラメータ制約による予測降雨場の変化パターン

(※「✓」は有効とするパラメータを示す)

予測パターン	降雨場の変化	パラメータの条件								
		C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉
1-Parallel motion	降雨強度面の変化を平行移動のみに限定した場合。降雨強度面の発達・衰弱は考慮しない。			✓			✓			
2-Rotation motion	降雨強度面の変化を平行移動および回転のみに限定する場合。降雨強度面の発達・衰弱は考慮しない。		✓	✓	✓		✓			
3-Full motion	降雨強度面の変化に制約を設けない場合。降雨強度面の発達・衰弱は考慮しない。	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
4-Parallel & Growth	降雨強度面は平行移動させ、降雨強度面の発達・衰弱項を有効にした場合。			✓			✓	✓	✓	✓
5-Rotation & Growth	降雨強度面は平行移動および回転に加え、発達・衰弱しながら変化する。		✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓
6-Full motion & Growth	パラメータに制限を設けず、すべてのパラメータを有効にして予測を行う。	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

3) 予測メンバーの出力

推定したパラメータと移流モデルの式から現在時刻の降雨強度面を変化させ、将来の降雨強度面を予測する。移流モデルでは1メンバーの予測値を出力する。

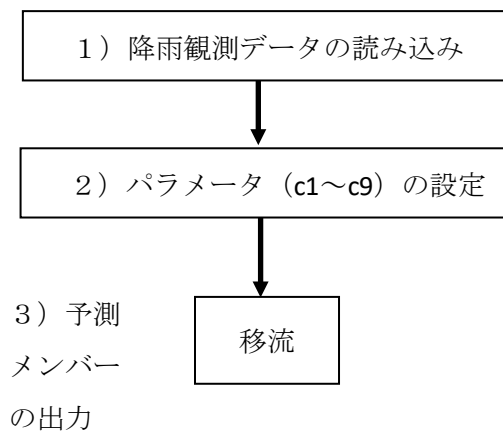


図 3-39 移流モデルの予測手順

(2) 特異移流モデルの予測手順

1) 降雨観測データの読み込み

降雨観測値（レーダ観測値）を読み込む。

2) パラメータ (C1~C9) の設定

回帰式（移流モデルの基礎式より）より、観測データから格子点毎に求められる定数 C1~C9 を設定する。

3) 観測誤差の設定

予測評価領域の「誤差の方向」に「誤差の大きさ」を与えることにより、誤差が最大・最小に発展する方向を求める。誤差が最小に発展する方向 $\delta 1$ 、誤差が最大に発展する方向 $\delta 2$ を XY 方向に足し引きすることにより、誤差を考慮した 4 メンバーの降雨予測結果を得る。

①誤差の方向：摂動の線形発展理論によって最大・最小に発展する初期値の摂動方向（特異ベクトル）を決定する。

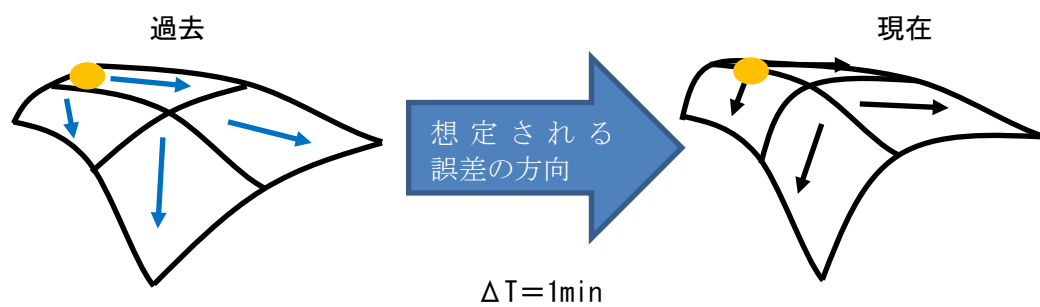


図 3-40 誤差の方向の概念

②誤差の大きさ：「移流モデルによる過去 ($\Delta T=1\text{min}$)を起点とした現在の予測値」－「現在の実測値」より、誤差の大きさを予測誤差の平均値として算出する。

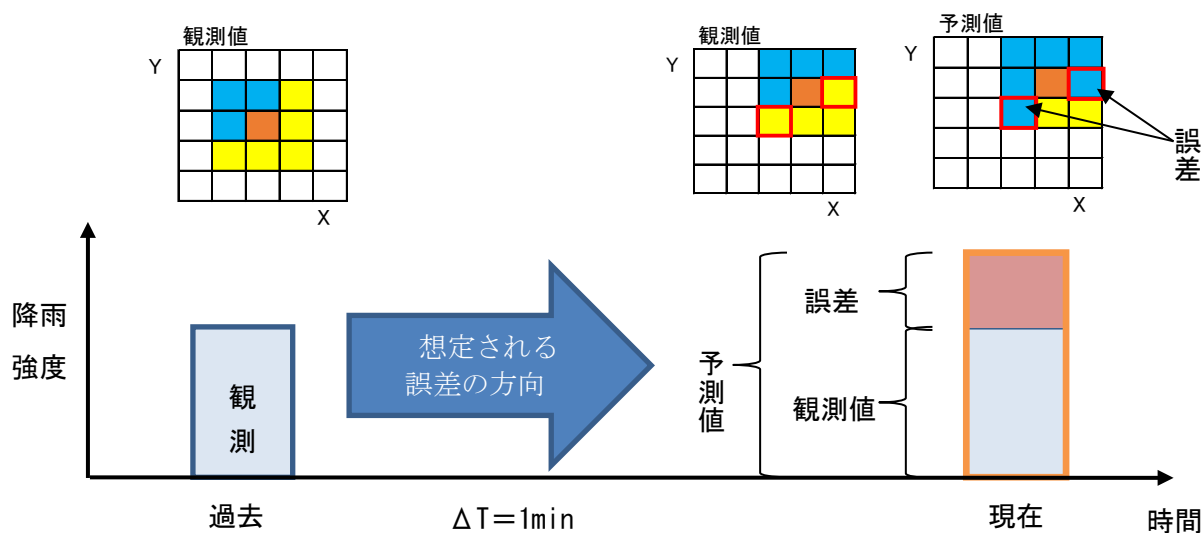


図 3-41 誤差の大きさの概念

4) 予測メンバーの出力

推定したパラメータと移流モデルの式から現在時刻の降雨強度面を変化させ、将来の降雨強度面を予測する。特異移流モデルでは、移流モデル 1 メンバーと特異移流モデルによる 4 メンバーの計 5 メンバー予測値を出力する。

5) 予測値の処理

特異移流モデルによる移流モデル 1 メンバーと特異移流モデル 4 メンバーの計 5 メンバー予測値はのそれぞれの予測メンバーの各メッシュの値に対し「最大値」、「平均値」、「中央値」を求め、3 パターンの予測値（統計量）を算出する。

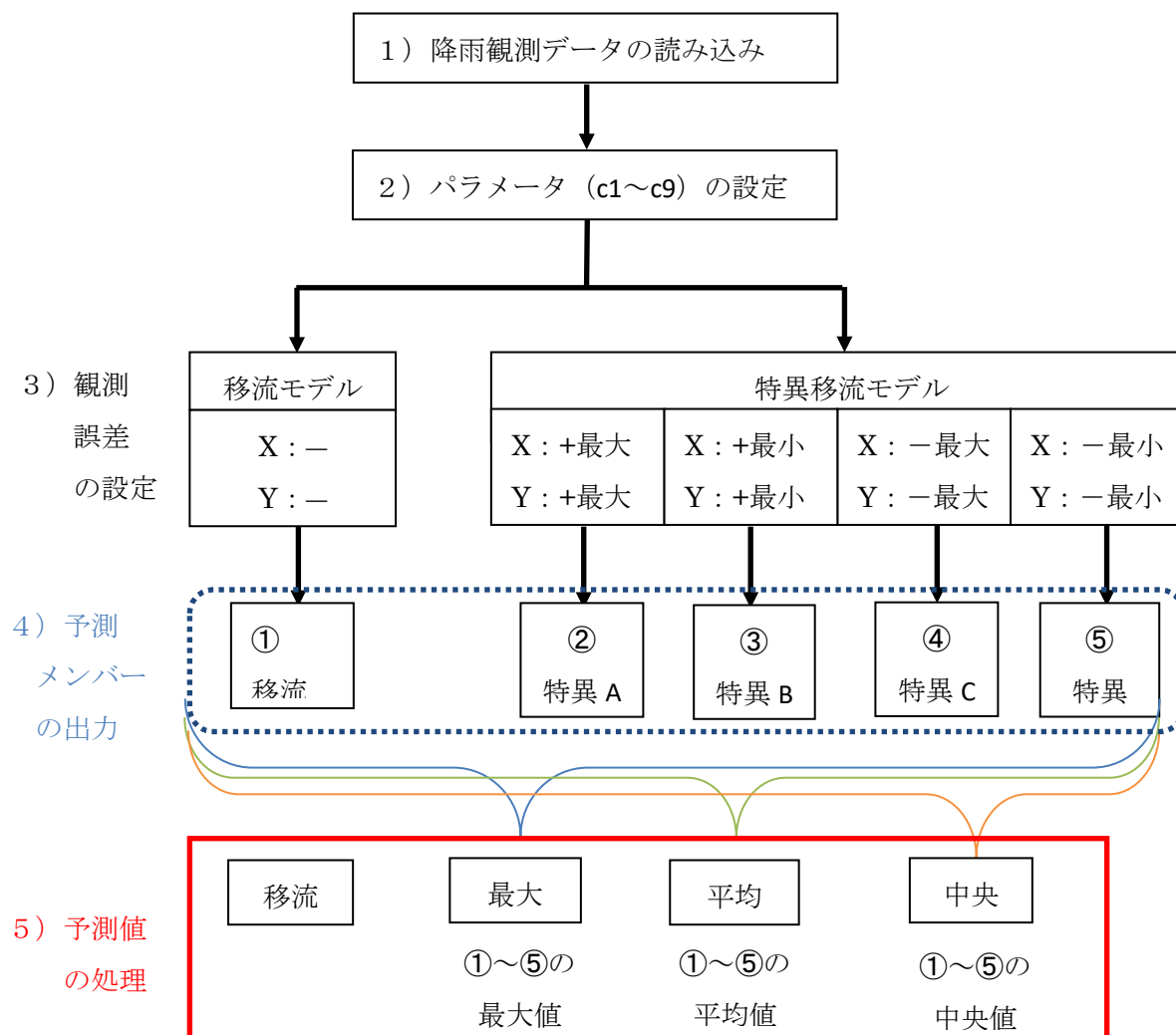


図 3-42 特異移流モデルの予測手順

3.4.3 降雨予測モデルの適用範囲

降雨予測手法は、力学的または運動学的な解法によるものに大別される。

- ・力学的解法による予測（数値気象モデル）

降雨強度、気温、気圧、風速、湿度等の複数の初期値より予測を行う手法。

- ・運動学的解法による予測

レーダ等から得られる降雨強度二次元分布データを用いて予測を行う。

移流モデルおよび特異移流モデルは、運動学的な解法にて降雨の移動過程を予測するものであり、以下に降水現象に対する適用性について示す。

- ・熱雷や線状降水帯といわれる積乱雲に起因する豪雨（いわゆるゲリラ豪雨）は、運動学的な解法にてその現象を十分に捉えることができ、本予測モデル適用性は高い。ただし、発達途中の集中豪雨に対しては、例えば 10 分後の発達過程については予測が困難ではあるが、1 分周期にて観測する降雨情報よりその発達過程を随時補完し予測に反映することにより、予測精度を高めることができる。
- ・台風や前線による降雨は、力学的に現象をとらえる必要があり、前者の降水現象に比べ、本予測モデル（運動学的な解法）による適用性は低い。

表 3-9 降水現象に対する運動学的降雨予測モデルの適用性

降水現象	特長	適用性
台風	台風は、積乱雲が集まったもので、強い風と共に、広範囲かつ長時間にわたって降雨が発生する。	△
前線	前線は、寒冷前線・温暖前線・停滞前線・閉塞前線に分類され、寒冷前線、閉塞前線にて強い降雨が発生する。	○
熱雷	熱雷とは、夏季強い日射により局地的に発生する積乱雲による豪雨。短時間・局所的に強い雨が発生する。いわゆる近年のゲリラ豪雨。	◎
線状降水帯	積乱雲が帯状に並び、長時間・広域にわたり強い雨が発生する。	◎
雨雪まじり、雪	雨雪まじり、雪が降るものであり、降水量としては非常に小さい。	—

3.4.4 降雨予測精度の評価

(1) 評価方法

1) 目的

降雨予測精度の評価基準として自助・共助支援では、最悪の状況においても自助対応のリードタイムを確保することが必要であり、施設運転支援では、24時間、365日（小降雨～大降雨）を通して予測精度が高いことが求められる。これら用途に応じて適切な降雨予測パターンを選定するため、降雨予測パターンごとの降雨予測精度を確認した。

2) 性能・目標

実証研究では、移流、特異平均、特異中央、特異最大の4パターンの降雨予測パターンの予測精度を比較し、降雨予測パターンごとに以下の基準で評価を実施した。評価をするうえで、5分後、15分後、25分後それぞれの予測雨量を平均化することにより、予測パターン毎の予測雨量の傾向を捉え、用途に応じた予測性能の確認を実施した。

①10分間雨量の予測誤差

瞬間的な降雨量の評価として10分間雨量の誤差量にて、精度評価を行った。

「5、15、25分後予測の各時刻の10分間雨量の予測誤差の累計値／予測数」が0に近いものを、予測精度が高いと判定した。

②累積雨量の予測誤差

全体的な降雨量の評価として累積雨量の誤差量にて、精度評価を行った。本実証研究では「5、15、25分後予測の累積雨量の予測誤差の累計値／3」が0に近いものを予測精度が高いと判定した。

3) 評価手順

降雨予測パターン（移流，特異最大，特異平均，特異中央）毎の降雨予測精度を 5 分後，15 分後，25 分後予測の 10 分間雨量および累積雨量の平均誤差量により比較を行った。実証研究における評価手順を図 3-43 に示す。

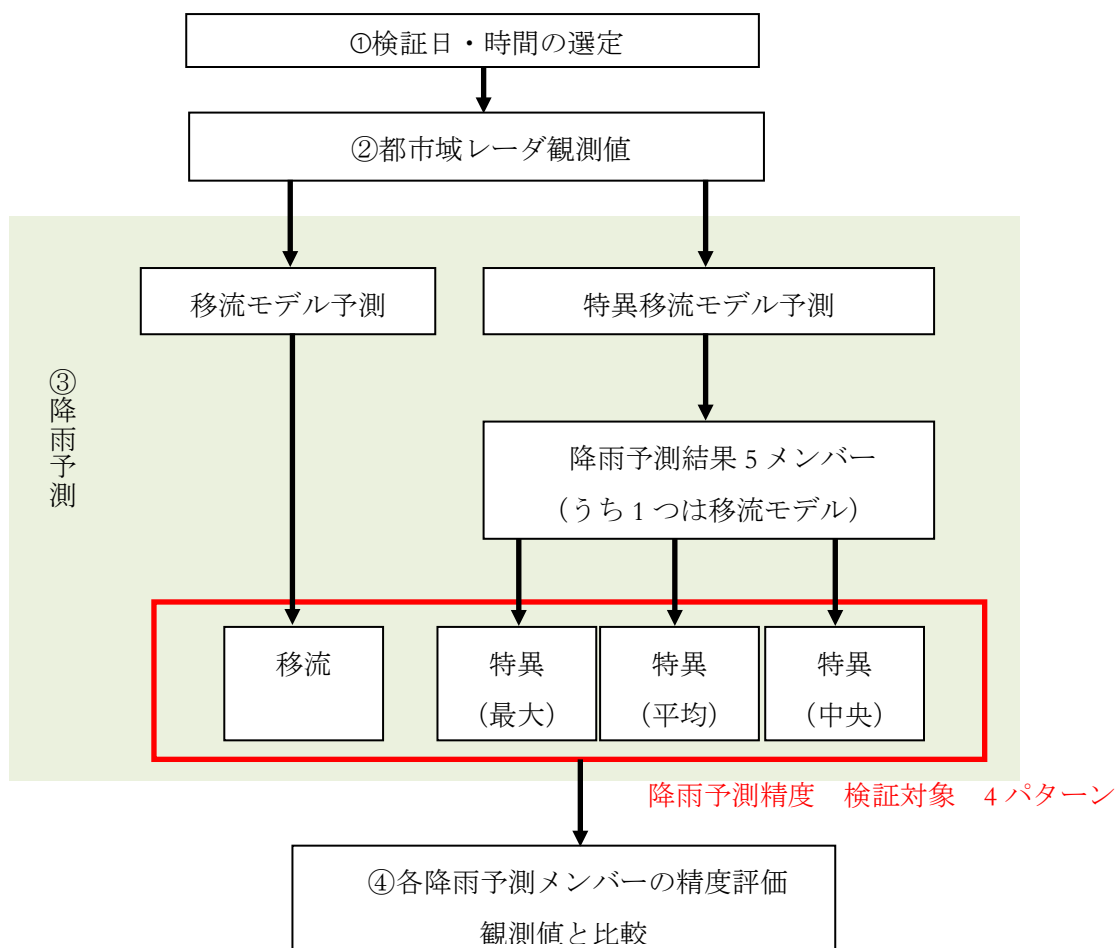


図 3-43 短時間降雨予測モデル評価手順

①評価日・時間の選定

評価日・時間は，40mm/h 以上の降雨が評価領域内に発生した時間帯を抽出する。

②都市域レーダ観測値

都市域レーダ観測情報を予測モデルにインプットする。

③降雨予測

移流モデルおよび特異移流モデルの 30 分間予測値を出力する。

④各降雨予測パターンの精度評価

各降雨予測値と観測値の誤差を比較する。

4) 評価範囲

評価範囲は、以下のとおりした。

福井市：福井市内の全排水区

富山市：呉羽排水区

(2) 評価結果

1) 特異移流予測メンバーの降雨分布確認

特異移流モデルの予測雨量の評価をするうえで、移流モデルに与えた誤差によって空間的な広がりをもった5つの予測メンバーが示す降雨域の範囲内に、評価対象である排水区が捉えられていることを確認した。確認結果について、最も強い雨を観測した富山 平成28年7月26日の中から、10分後予測結果を事例として図3-44および図3-45に示す。

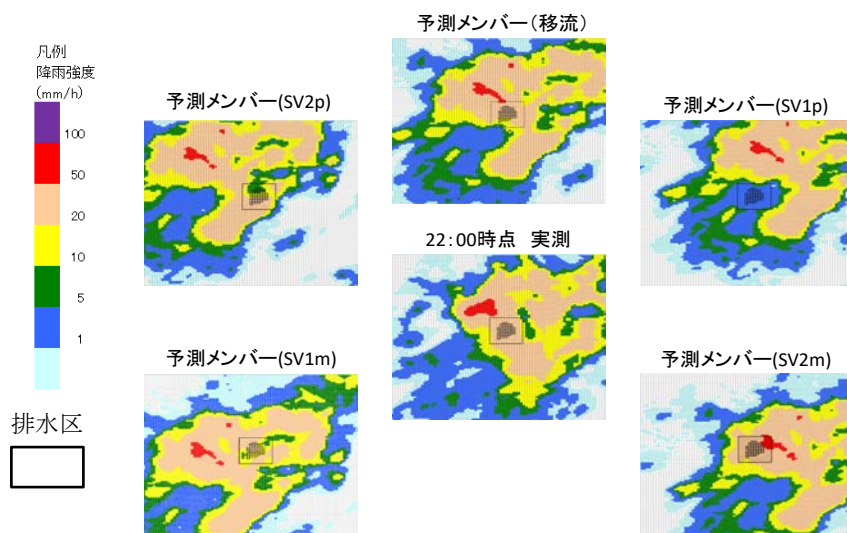


図 3-44 予測メンバー降雨分布（平成28年7月26日 22時00分の予測結果）

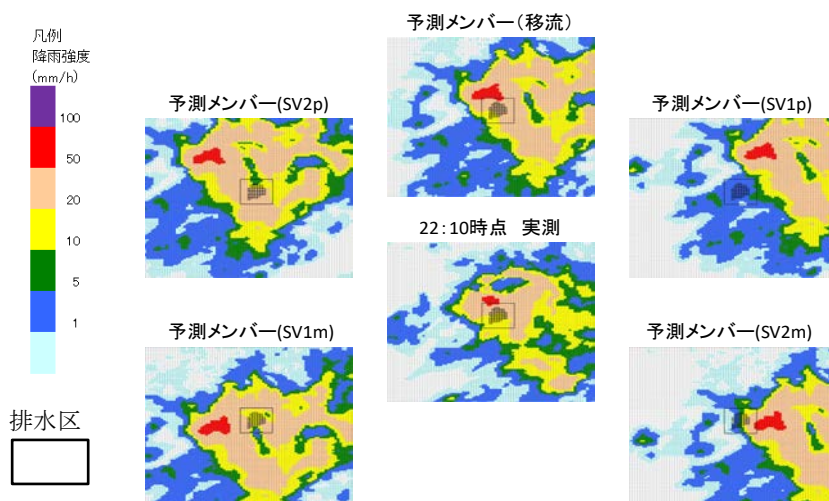


図 3-45 予測メンバー降雨分布（平成 28 年 7 月 26 日 22 時 10 分の予測結果）

2) 雨量の評価結果

平成 28 年 4 月 1 日～11 月 30 日までの全降雨のうち、福井・富山の情報配信基準水位を超える降雨で解析を実施した。累積雨量、10 分間雨量の誤差量の評価結果を表 3-10 および表 3-11 に示す。

①累積雨量

（福井）誤差量(mm) 移流-1.3 特異最大+12.3 特異平均-2.6 特異中央-5.1

（富山）誤差量(mm) 移流-4.4 特異最大+13.5 特異平均-6.5 特異中央-10.1

- ・移流，特異平均が実測値に近い値となった。
- ・概ね特異最大がプラス方向の誤差となった。

表 3-10 短時間降雨予測モデル 累積雨量の評価結果

福井市					
検証対象降雨	累積雨量 (mm)				
	実測 (都市域レーダ)	移流	特異 最大	特異 平均	特異 中央
7月13日(05:40～07:00)	13.7	13.7(0.0)	26.0(+12.3)	11.7(-2.0)	9.4(-4.3)
10月9日(01:10～04:10)	22.2	23.4(+1.2)	42.2(+20.0)	21.1(-1.1)	17.5(-4.7)
8月20日(18:40～20:30)	13.8	7.6(-6.2)	19.6(+5.8)	7.5(-6.3)	4.9(-8.9)
9月8日(09:00～11:00)	14.5	14.8(+0.3)	26.2(11.7)	12.5(-2.0)	10.5(-4.0)
6月22日(19:50～21:20)	13.3	11.7(-1.6)	24.8(+11.5)	11.8(-1.5)	9.5(-3.8)
平均誤差量	-	-1.3	+12.3	-2.6	-5.1
富山市					
検証対象降雨	累積雨量 (mm)				
	実測 (都市域レーダ)	移流	特異 最大	特異 平均	特異 中央
7月26日(21:30～23:50)	43.3	35.5(-7.6)	65.7(+22.6)	28.7(-14.4)	24.7(-18.4)
9月18日(05:00～09:50)	31.7	33.5(+1.8)	53.1(+21.4)	33.0(+1.3)	29.7(-2.0)
7月13日(15:50～16:30)	15.1	6.5(-8.6)	11.5(-3.6)	4.0(-11.1)	2.2(-12.9)
7月13日(18:30～19:30)	14.4	11.3(-3.1)	35.7(+21.3)	12.0(-2.4)	6.8(-7.6)
8月09日(10:00～12:30)	11.6	7.0(-4.6)	17.6(+6.0)	5.5(-6.1)	2.2(-9.4)
平均誤差量	-	-4.4	+13.5	-6.5	-10.1

※ 表に示す予測値は、5分後、15分後、25分後予測の累積雨量を平均化した値

※ ()内は予測した累積雨量と観測した累積雨量の差分(誤差量)

次頁の図 3-46 から図 3-55 に累積雨量の評価結果を示す。

□福井市 平成28年7月13日

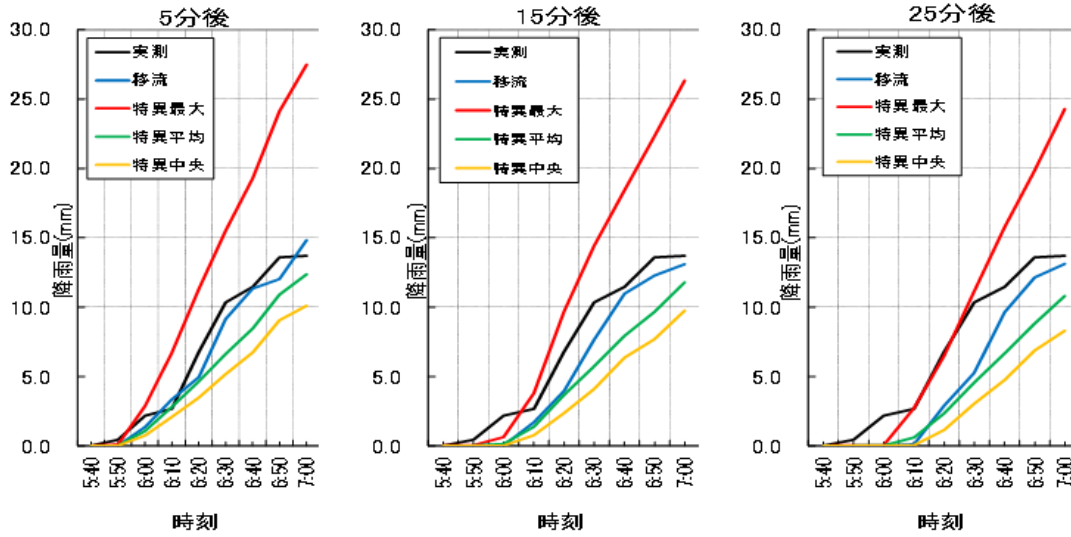


図 3-46 累積雨量の評価結果 (福井市 平成 28 年 7 月 13 日)

□福井市 平成28年10月9日

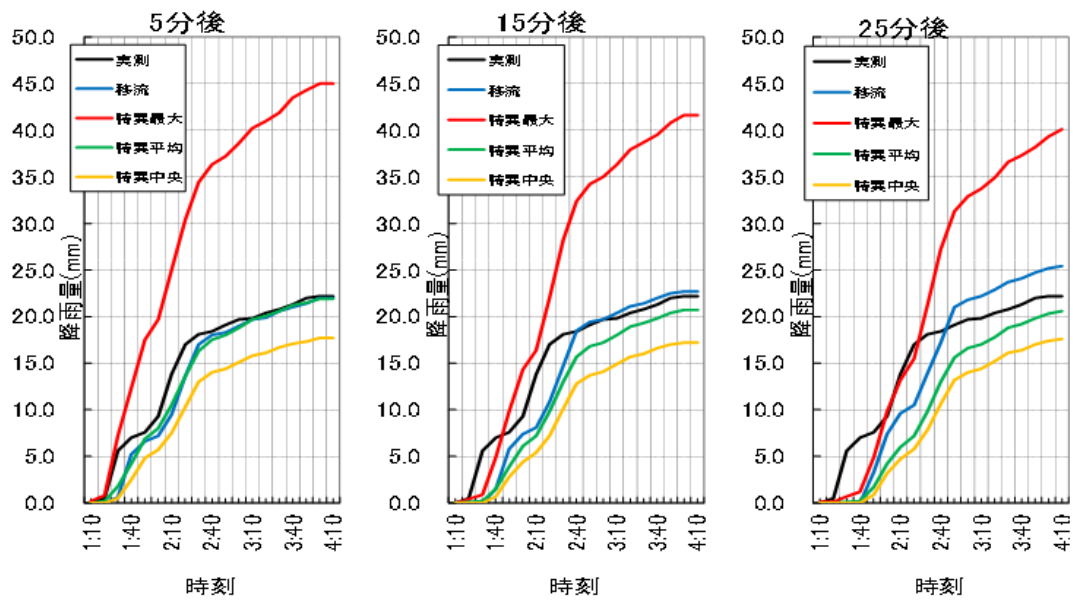


図 3-47 累積雨量の評価結果 (福井市 平成 28 年 10 月 9 日)

□福井市 平成28年8月20日

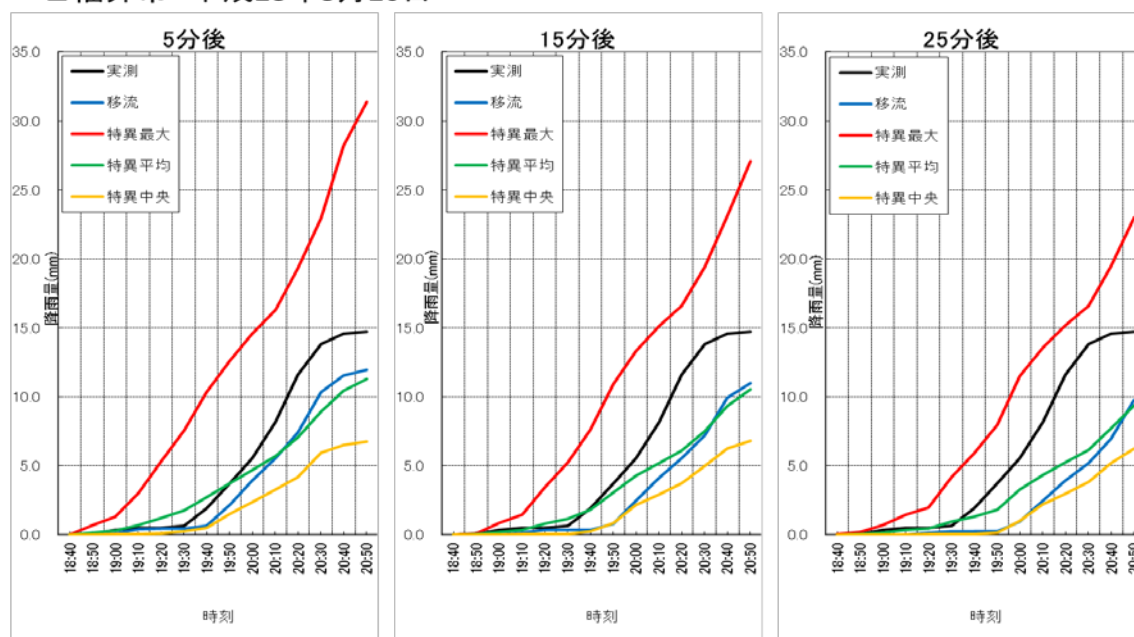


図 3-48 累積雨量の評価結果（福井市 平成 28 年 8 月 20 日）

□福井市 平成28年9月8日

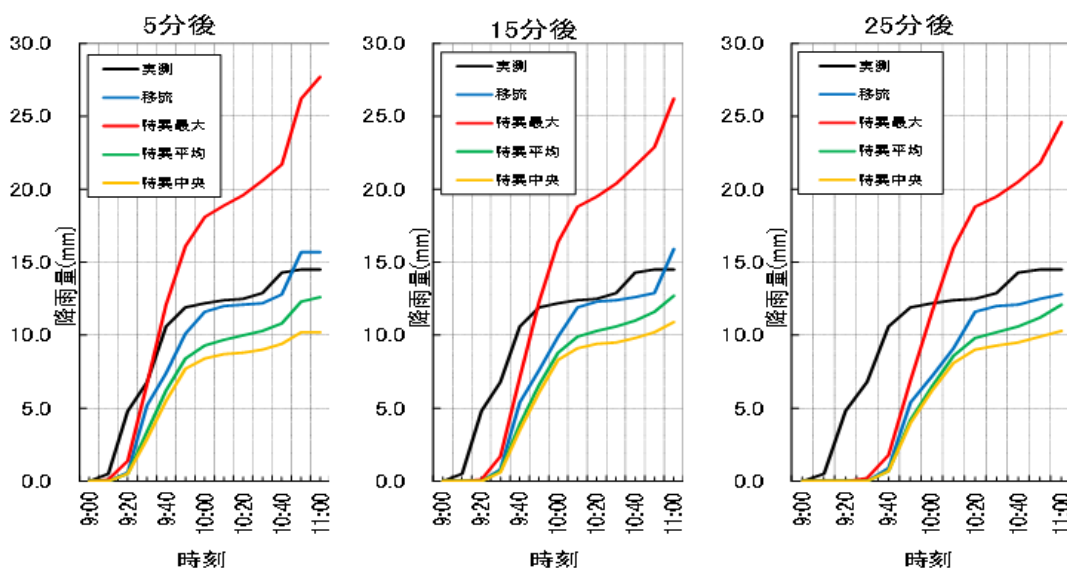


図 3-49 累積雨量の評価結果（福井市 平成 28 年 9 月 8 日）

□福井市 平成28年6月22日

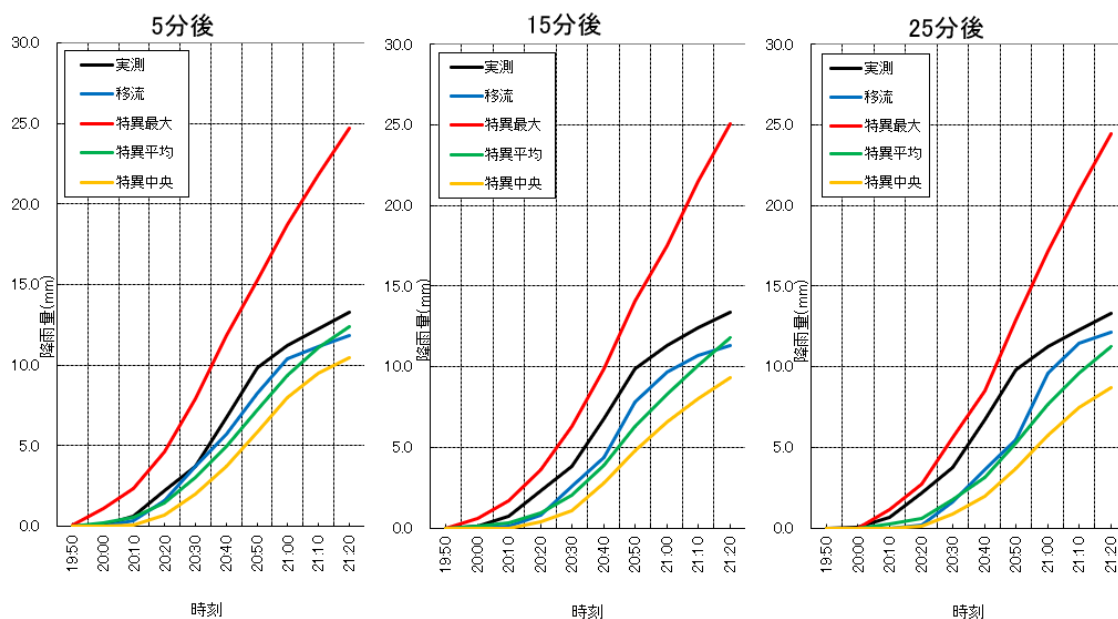


図 3-50 累積雨量の評価結果（福井市 平成 28 年 6 月 22 日）

□富山市 平成28年7月26日

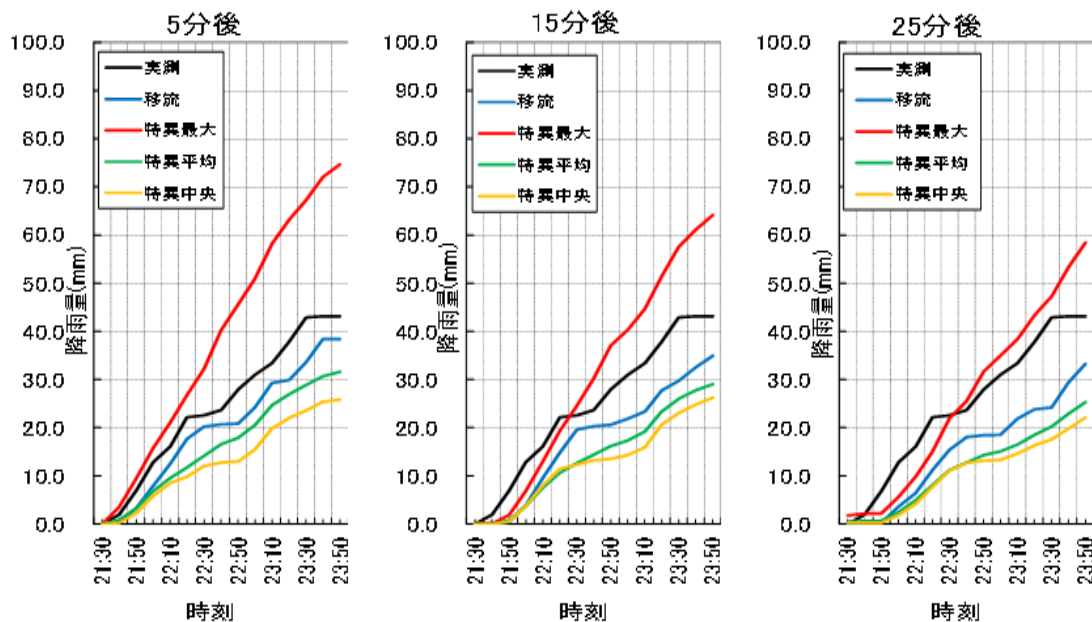


図 3-51 累積雨量の評価結果（富山市 平成 28 年 7 月 26 日）

富山市 平成28年9月18日

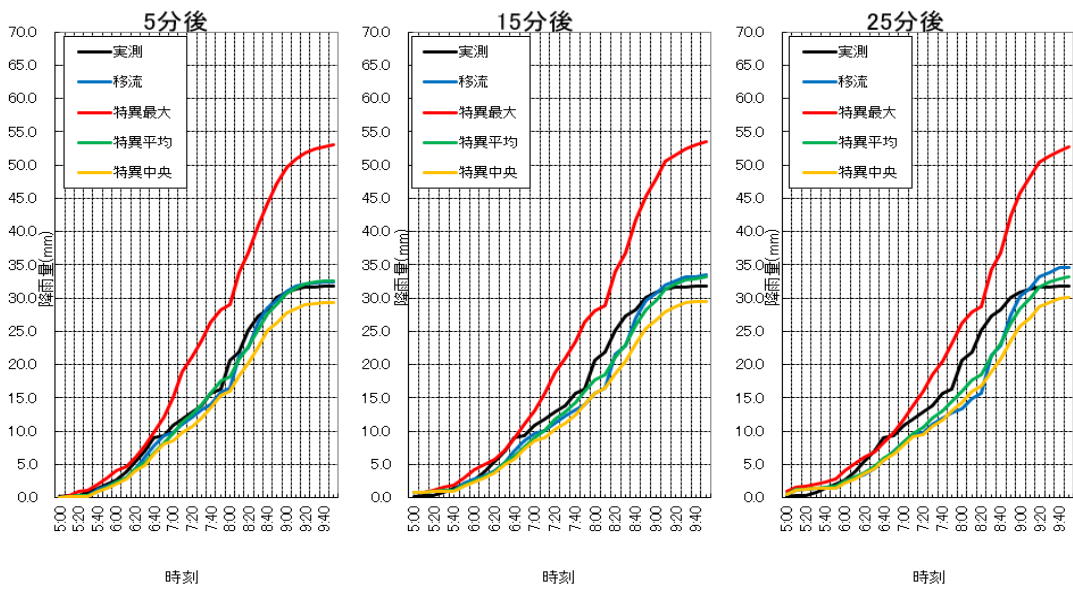


図 3-52 累積雨量の評価結果（富山市 平成 28 年 9 月 18 日）

富山市 平成28年7月13日

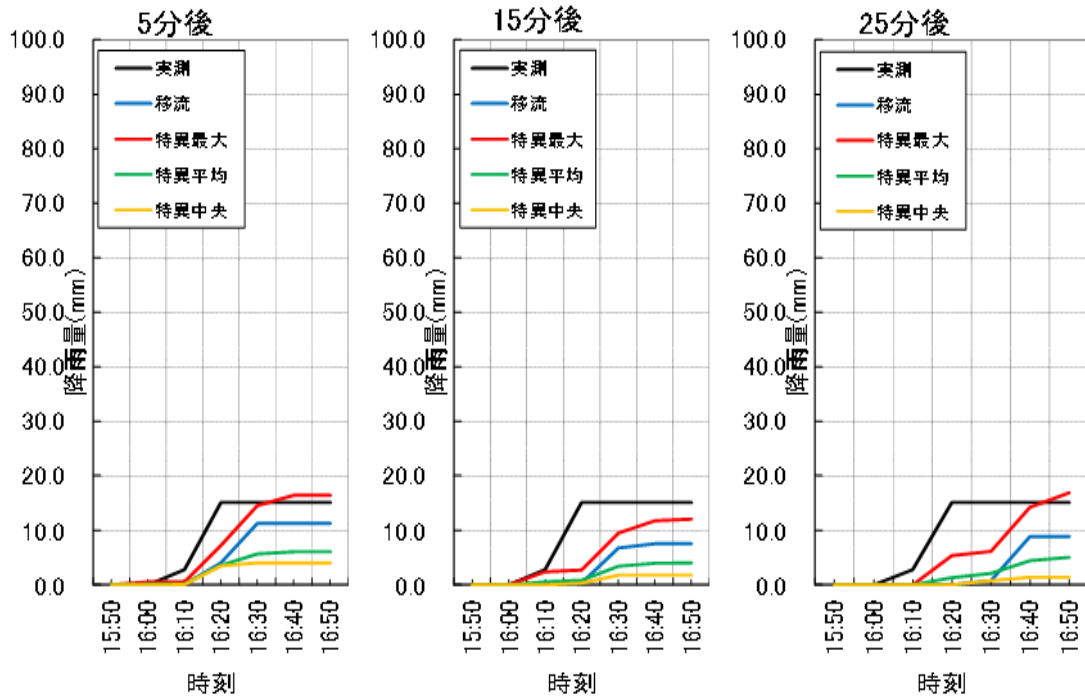


図 3-53 累積雨量の評価結果（富山市 平成 28 年 7 月 13 日）

富山市 平成28年7月13日

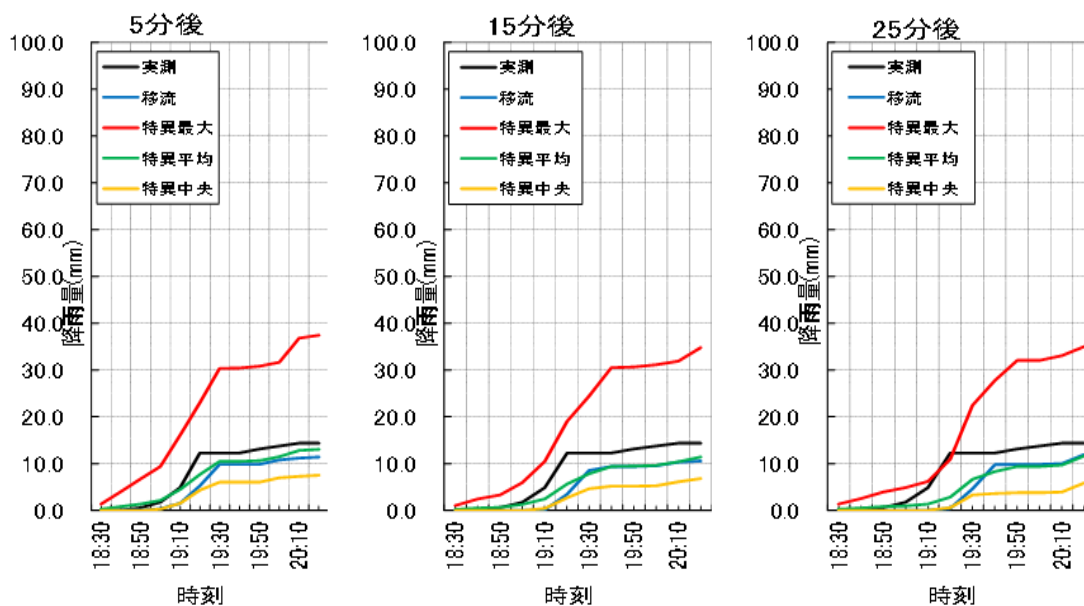


図 3-54 累積雨量の評価結果（富山市 平成 28 年 7 月 13 日）

富山市 平成28年8月9日

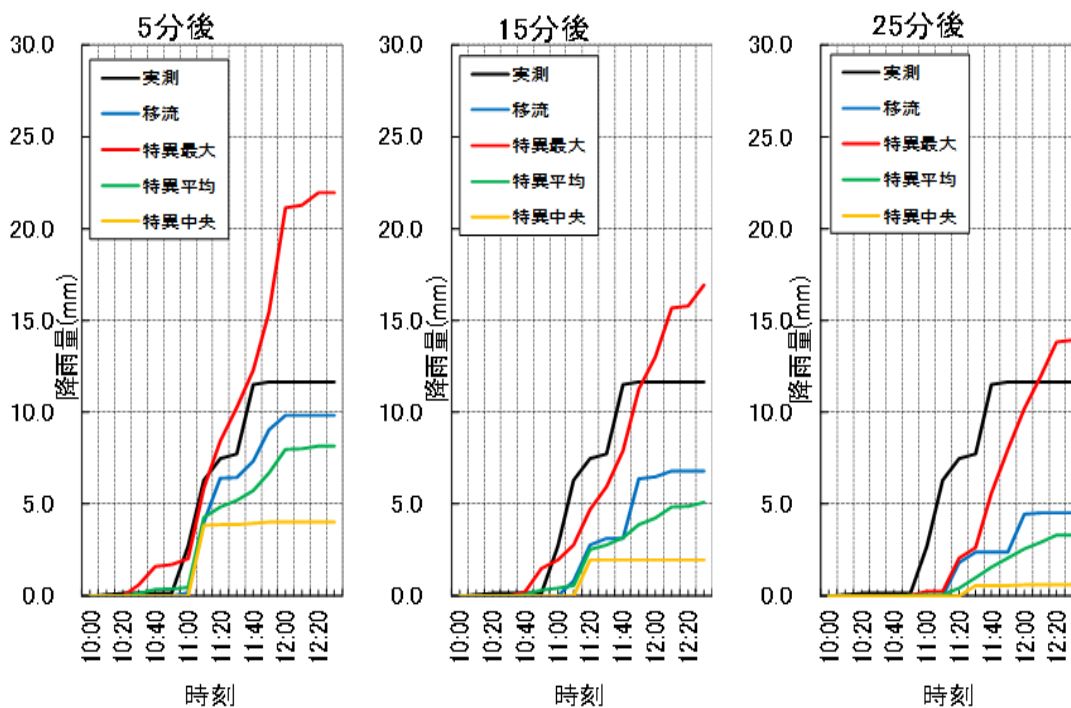


図 3-55 累積雨量の評価結果（富山市 平成 28 年 8 月 9 日）

②10 分間雨量

(福井) 誤差量 (mm/10min) 移流-0.1 特異最大+1.0 特異平均-0.2 特異中央-0.4

(富山) 誤差量 (mm/10min) 移流-0.4 特異最大+0.9 特異平均-0.6 特異中央-0.9

- ・ 移流, 特異平均が実測値に近い値となった。
- ・ 概ね特異最大がプラス方向の誤差となった。

表 3-11 短時間降雨予測モデル 10 分間雨量の評価結果

福井市					
検証対象降雨	10分間雨量(mm/10min)				
	実測 (都市域レーダ)	移流	特異 最大	特異 平均	特異 中央
7月13日(05:40~07:00)	1.5	1.5(0.0)	2.9(+1.4)	1.3(-0.2)	1.0(-0.5)
10月9日(01:10~04:10)	1.2	1.2(0.0)	2.2(+1.0)	1.1(-0.1)	0.9(-0.3)
8月20日(18:40~20:30)	1.2	0.6(-0.6)	1.6(+0.4)	0.6(-0.6)	0.4(-0.8)
9月8日(09:00~11:00)	1.1	1.1(0.0)	2.0(+0.9)	1.0(-0.1)	0.8(-0.3)
6月22日(19:50~21:20)	1.3	1.2(-0.1)	2.5(+1.2)	1.2(-0.1)	1.0(-0.3)
平均誤差量	-	-0.1	+1.0	-0.2	-0.4
富山市					
検証対象降雨	10分間雨量(mm/10min)				
	実測 (都市域レーダ)	移流	特異 最大	特異 平均	特異 中央
7月26日(21:30~23:50)	2.9	2.4(-0.5)	4.4(+1.5)	1.9(-1.0)	1.6(-1.3)
9月18日(05:00~09:50)	1.1	1.1(0.0)	1.8(+0.7)	1.1(0.0)	1.0(-0.1)
7月13日(15:50~16:30)	2.2	1.3(-0.8)	2.2(0.0)	0.7(-1.4)	0.3(-1.9)
7月13日(18:30~19:30)	1.2	0.9(-0.3)	3.0(+1.8)	1.0(-0.2)	0.6(-0.6)
8月09日(10:00~12:30)	0.7	0.4(-0.3)	1.1(+0.4)	0.3(-0.4)	0.1(-0.6)
平均誤差量	-	-0.4	+0.9	-0.6	-0.9

※ 表に示す数値は、5分後、15分後、25分後予測の10分間雨量を平均化した値

※ ()内は予測した10分間雨量と観測した10分間雨量の差分(誤差量)

次頁の図 3-56 から図 3-65 に 10 分間雨量の評価結果を示す。

福井市 平成28年7月13日

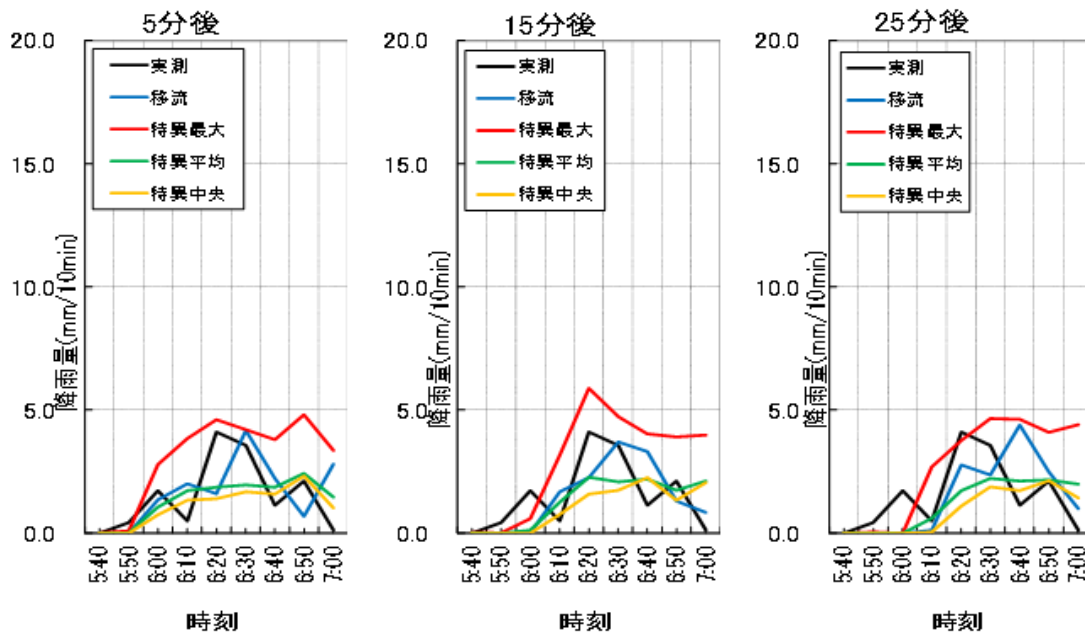


図 3-56 10 分間雨量の評価結果 (福井市 平成 28 年 7 月 13 日)

福井市 平成28年10月9日

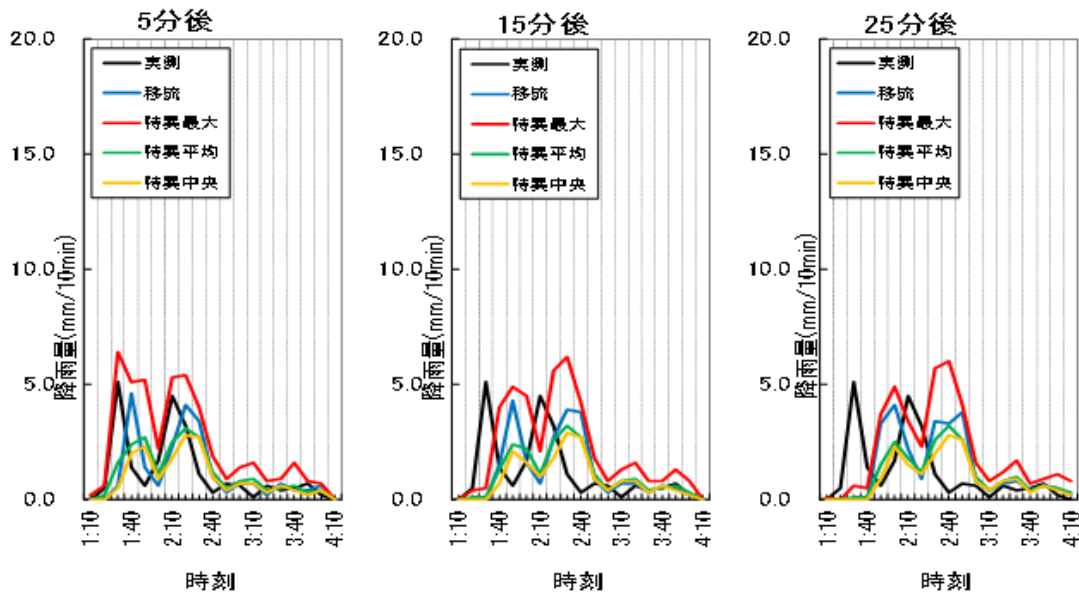


図 3-57 10 分間雨量の評価結果 (福井市 平成 28 年 10 月 9 日)

□福井市 平成28年8月20日

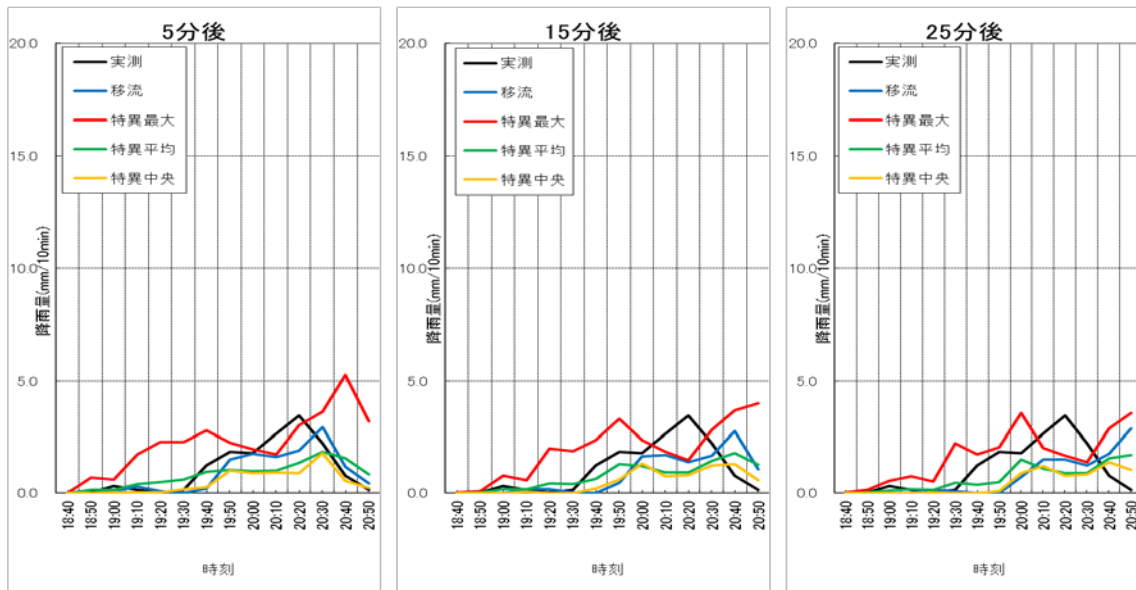


図 3-58 10 分間雨量の評価結果 (福井市 平成 28 年 8 月 20 日)

□福井市 平成28年9月8日

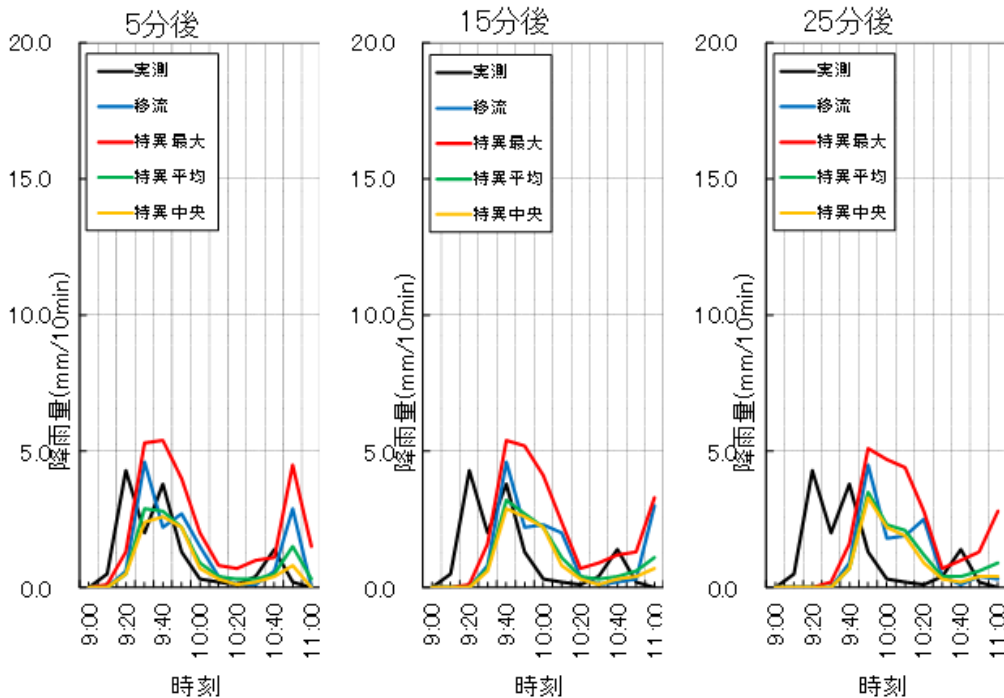


図 3-59 10 分間雨量の評価結果 (福井市 平成 28 年 9 月 8 日)

□福井市 平成28年6月22日

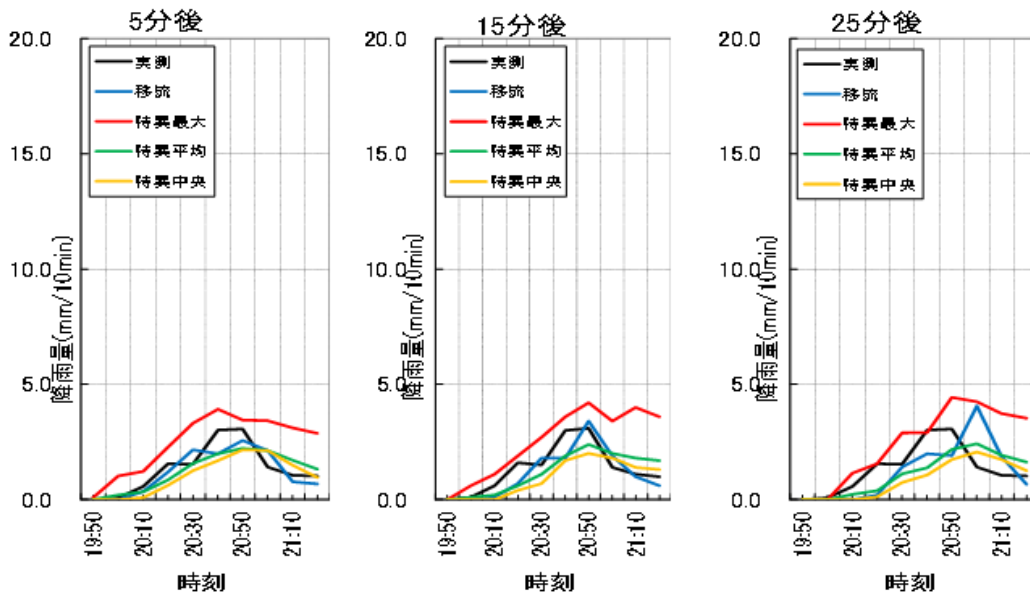


図 3-60 10 分間雨量の評価結果 (福井市 平成 28 年 6 月 22 日)

□富山市 平成28年7月26日

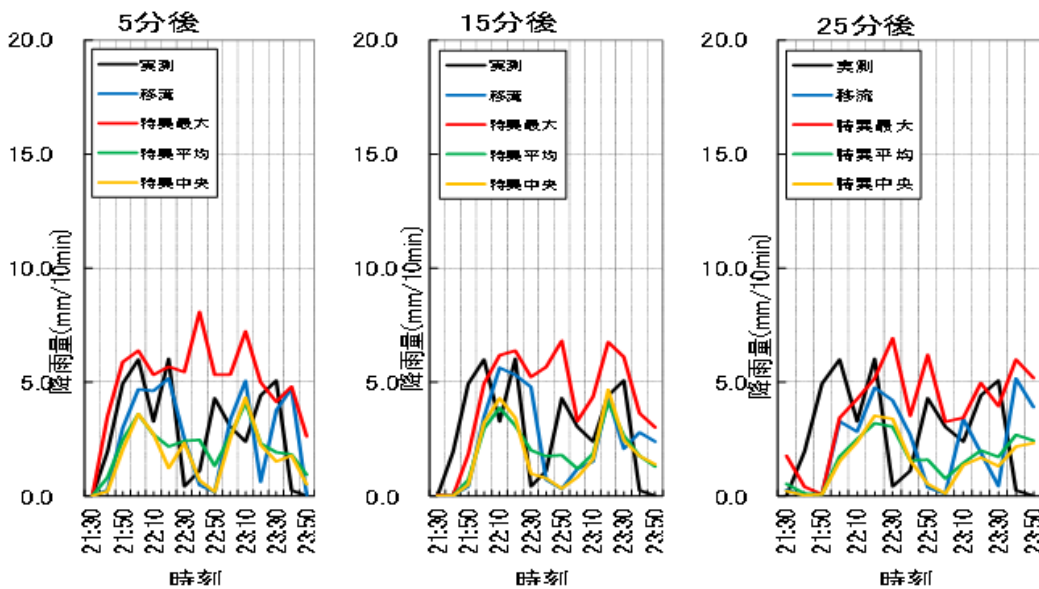


図 3-61 10 分間雨量の評価結果 (富山市 平成 28 年 7 月 26 日)

□富山市 平成28年9月18日

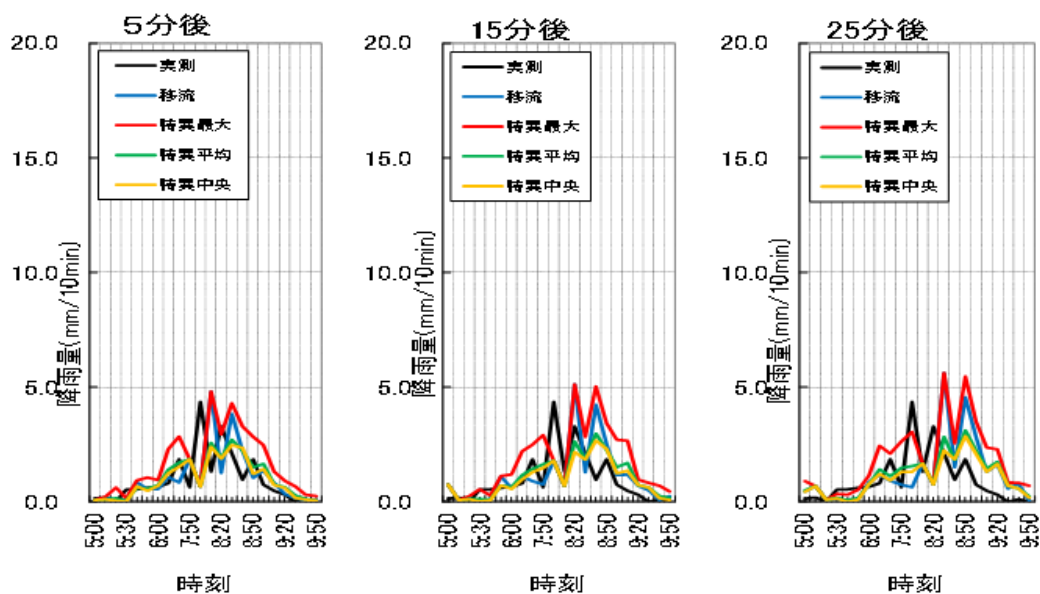


図 3-62 10分間雨量の評価結果（富山市 平成28年9月18日）

□富山市 平成28年7月13日

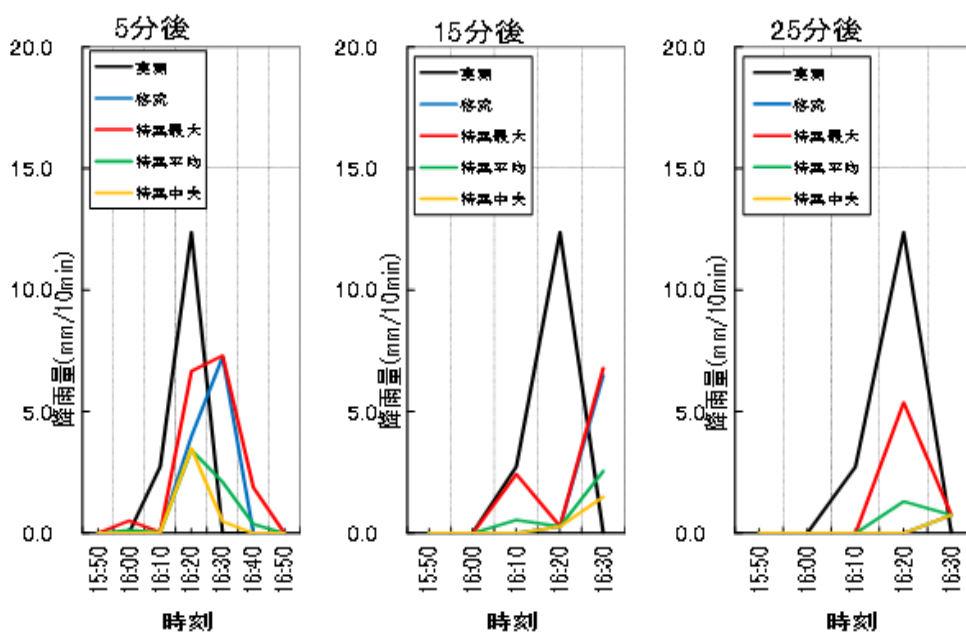


図 3-63 10分間雨量の評価結果（富山市 平成28年7月13日）

富山市 平成28年7月13日

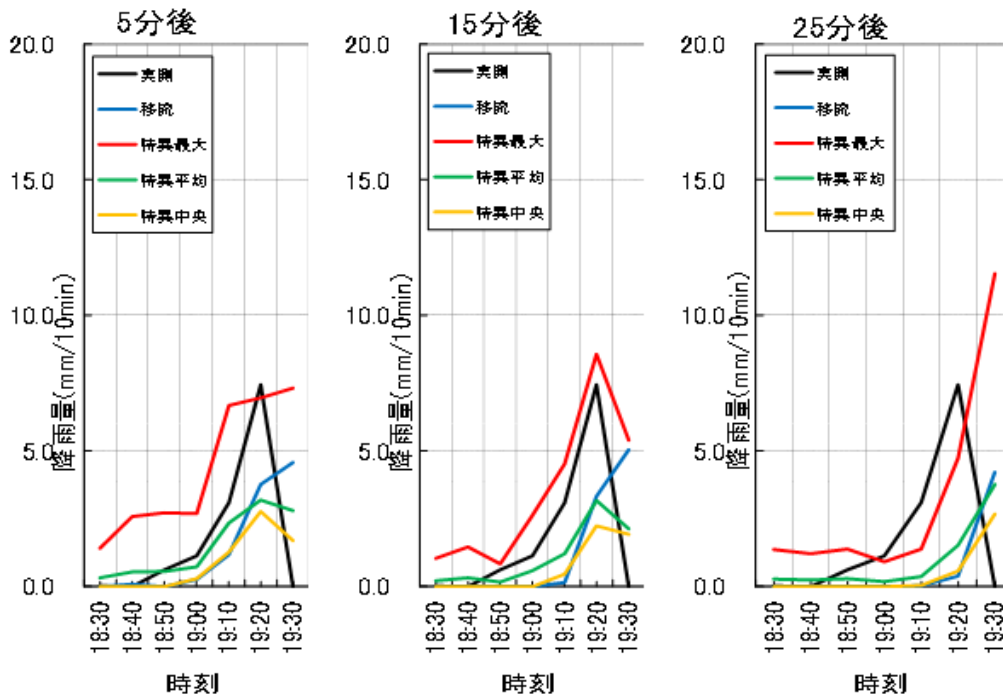


図 3-64 10分間雨量の評価結果（富山市 平成28年7月13日）

富山市 平成28年8月9日

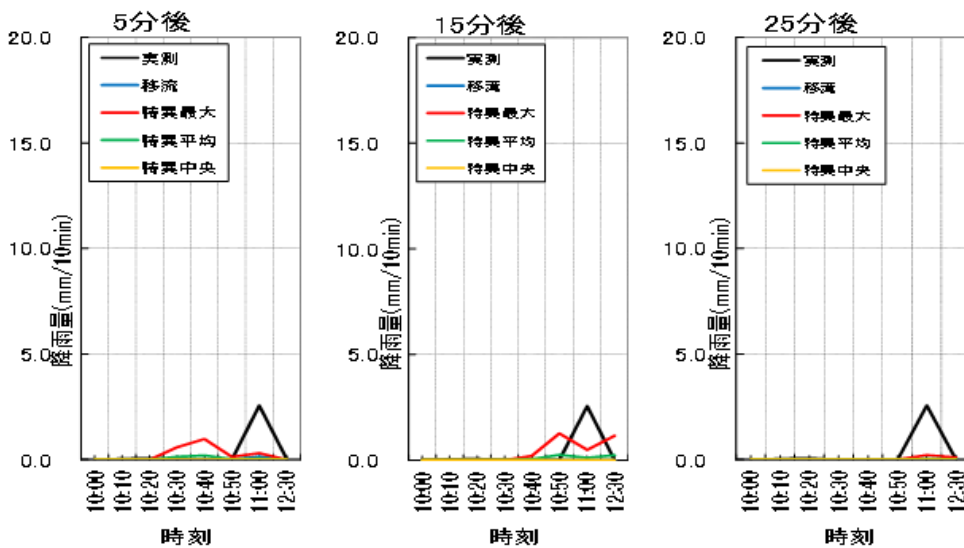


図 3-65 10分間雨量の評価結果（富山市 平成28年8月9日）

なお、降雨予測<実測となるケースにおいては、水位ピーク時において、水位予測値が、水位観測値と同等以上となることを確認し、降雨予測値の妥当性について確認した。

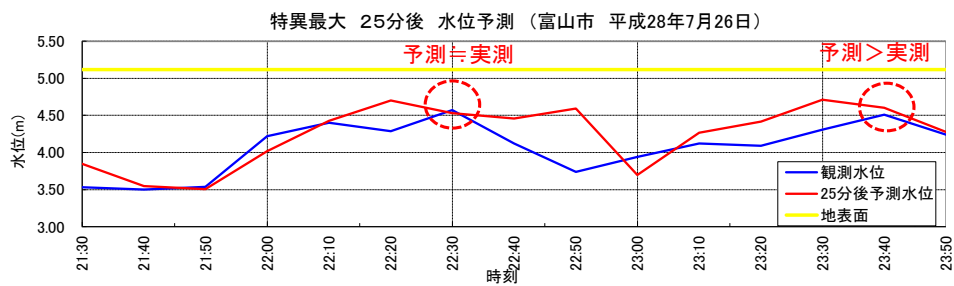
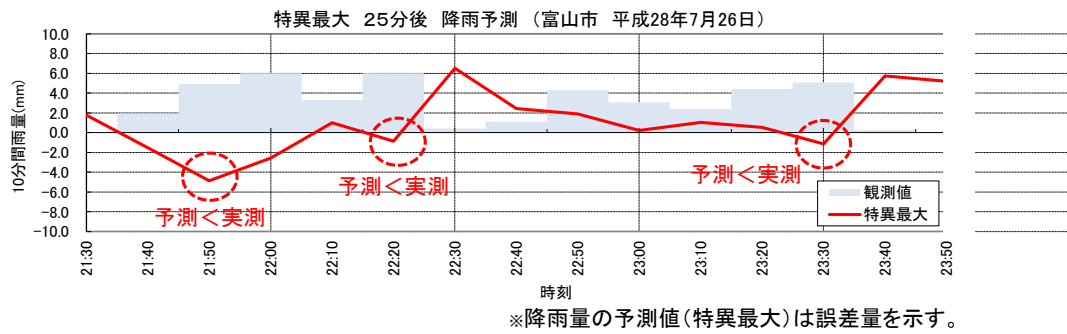


図 3-66 降雨予測<実測となるケースにおける予測値の妥当性の確認

3) 特異最大におけるマイナス誤差の要因

福井市の特異最大の予測誤差は、検証対象5ケースうち、すべてのケースでプラス誤差となったが、富山市においては、表 3-10 に示すとおり、7月13日(15:50~16:30)の1ケースにおいてマイナス誤差となった。

マイナス誤差の要因を分析するため、選定降雨の中で最も規模の大きい降雨を観測した富山7月26日とマイナス誤差となった7月13日16時のケースで、特異移流5メンバーの予測のばらつきの確認を行った。

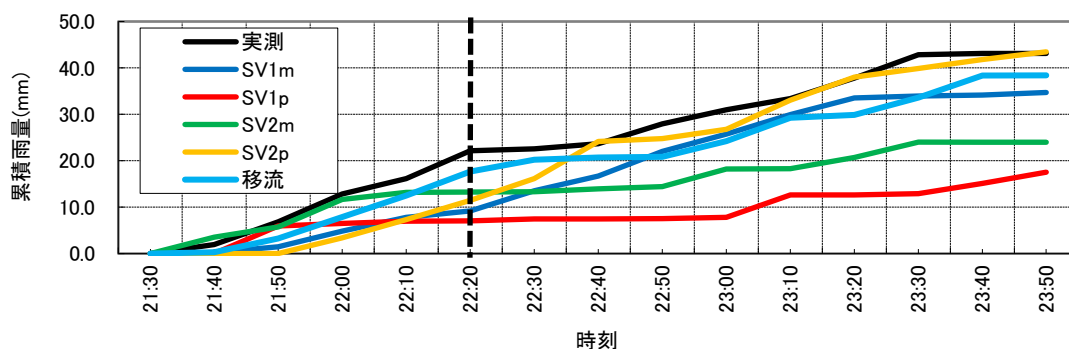


図 3-67 プラス誤差となった特異移流予測メンバーのばらつき(平成28年7月26日)

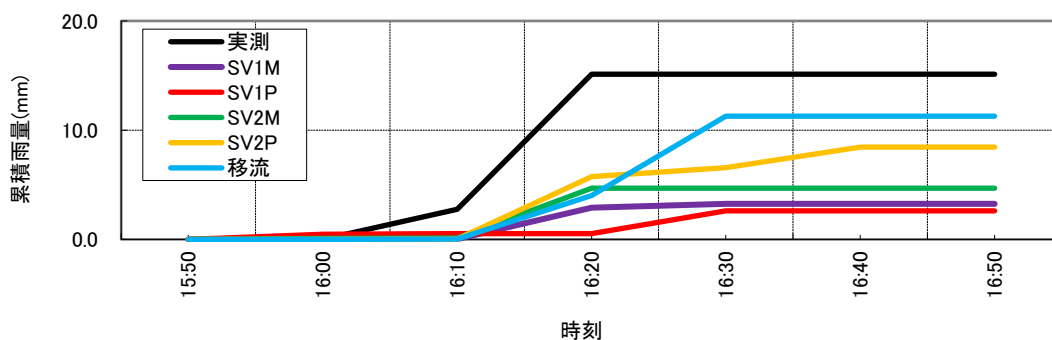


図 3-68 マイナス誤差となった特異移流予測メンバーのばらつき(平成28年7月13日)

プラス誤差となったケースでは、各メンバーの排水区平均雨量が概ね実測に近い値を示しているのに対し、マイナス誤差となったケースでは、実測に対し、小さい値を示している。当該現象が発生した要因を確認するため、最も誤差の広がり大きい16時20分時点の降雨分布の確認を行った。その結果、**図 3-69**に示すとおり、予測メンバーの強降雨域の平面的な広がりが大きく、弱い降雨域が排水区上に位置したことによるものであった。

- ・ マイナス方向の誤差のケース：排水区上に弱い降雨域が分布
- ・ プラス方向の誤差のケース：排水区上に強降雨域が分布

時系列的に雨域の移動方向について確認したところ、**図 3-70**に示すとおり、以下のことが確認できた。

- ・ マイナス方向の誤差のケース：複数の強降雨域が異なる方向に移動している。
- ・ プラス方向の誤差のケース：強降雨域の平面的な移動が直線的である。

以上のことから、複数の強降雨域が異なる方向に移動する場合、特異最大でも、マイナス誤差が発生する可能性があることが確認された。

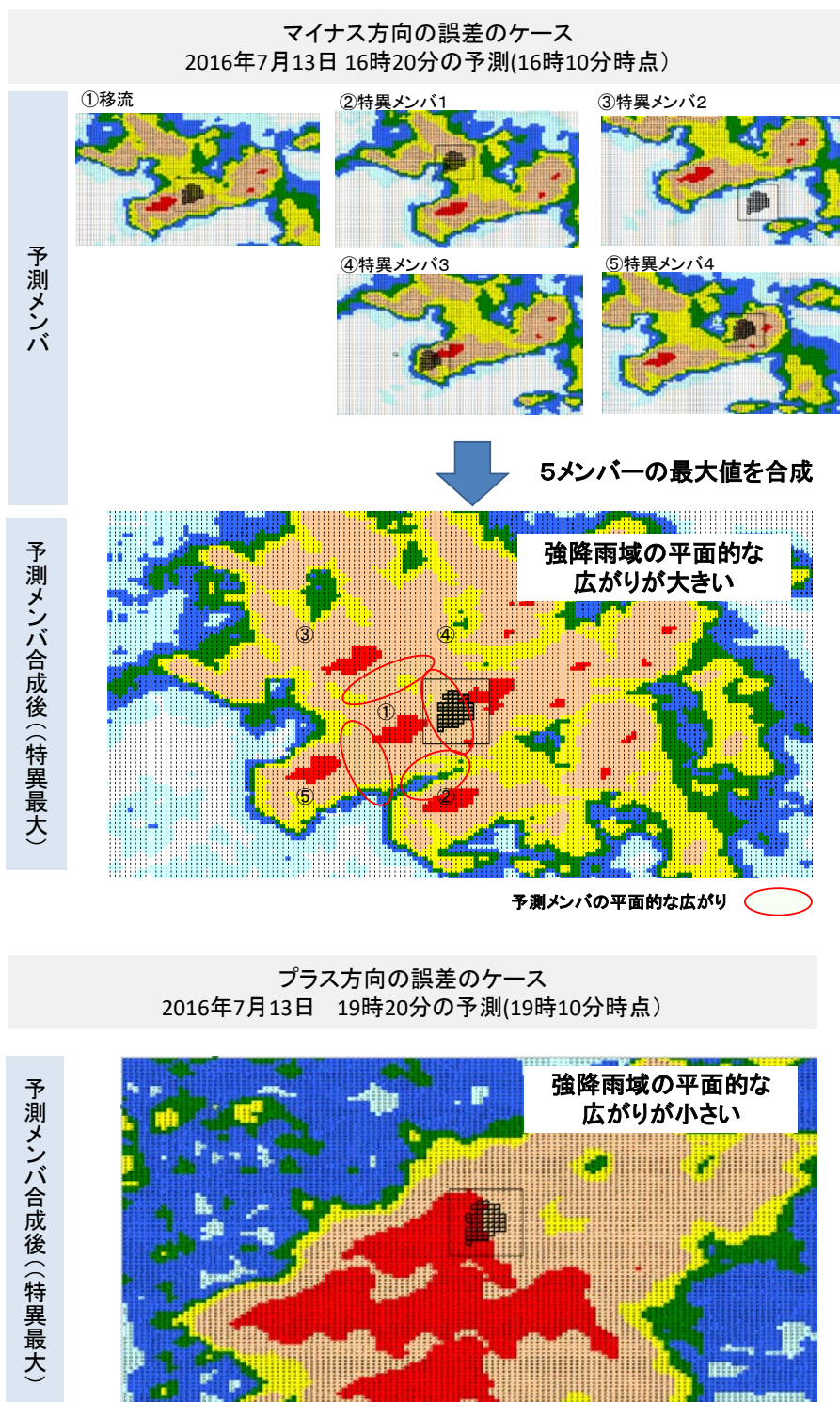


図 3-69 マイナス方向とプラス方向誤差のケースにおける特異最大予測値

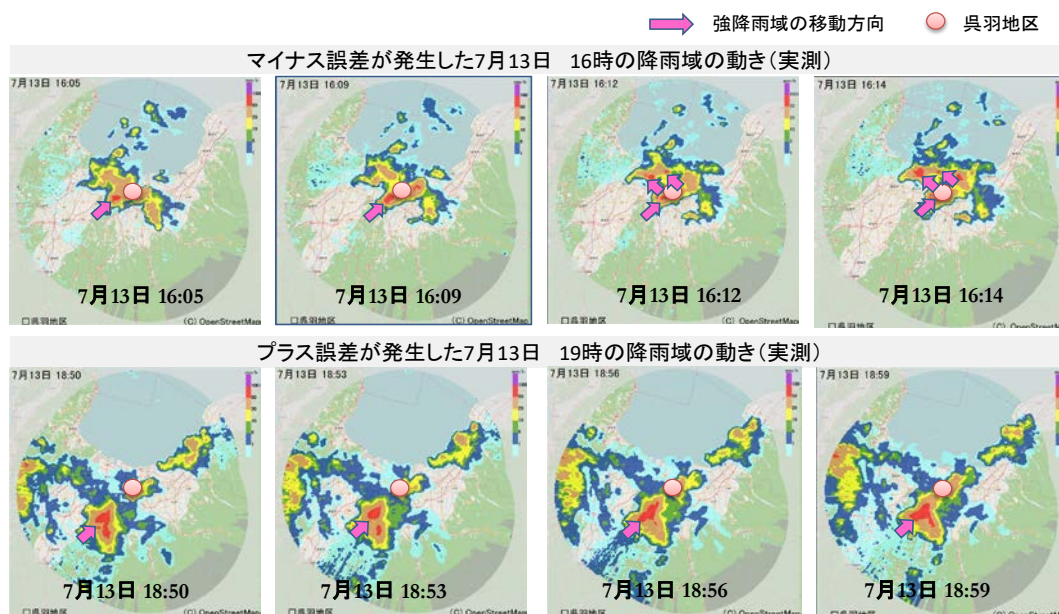


図 3-70 マイナス方向とプラス方向誤差のケースにおける雨域の移動方向

4) 課題

上記の結果から、特異最大に関しては、実測に対してプラス誤差となるよう予測メンバーの強降雨域の平面的な広がりを見直し、補正する新たな式を検討することが必要である。

また、特異平均、特異中央に関しては、表 3-10 および表 3-11 に示すとおり、実測を下回る予測結果が確認されている結果について、図 3-67 に示した予測のばらつき（誤差）の幅を少なくするための方策を検討し、より実測に近づけるよう予測精度の向上を図る必要がある。

3.5 リアルタイム流出解析技術の特徴と性能評価

3.5.1 リアルタイム流出解析技術の特徴

リアルタイム流出解析技術には、計算処理時間の大幅な短縮とリアルタイム拡張性の確保が可能な InfoWorksICM (Integrated Catchment Model) を使用した。

InfoWorksICM は下水道と河川の統合解析を実現する統合解析プラットフォームであり、核となる解析エンジンは GIS システムとの統合やプログラムの最適設計により高い解析速度を維持することが可能である。また、二次元的に氾濫を可視化する際、画像処理の高速化のための GPU (Graphics Processing Unit) にも対応している。

上位機種であるリアルタイムシステムとも同一プラットフォーム上においてシームレスな連携を実現しており、リアルタイム解析では「バッチ処理技術」により、解析処理時間の大幅な短縮を実現している。特に、下水道雨水排水区の流達時間の多くが 60 分以内であることから、短時間で浸水予測を完了する能力が不可欠である。

また、一次元 (下水道管路内及び川道内) と二次元モデル (地表面) の両モデルの構築が可能であり、外水氾濫/内水氾濫と地下 (下水道管網ネットワーク) の統合解析を実現した。

雨量レーダの利活用については、既に C バンド及び X バンド MP レーダの読込機能を実装しており、他レーダの読込についても開発が比較的容易である。雨量レーダの情報はメッシュデータとして読込まれた後、下水道ネットワークモデルに設定される下位集水域 (Subcatchment) に分布型の雨量情報として適用される。下位集水域に複数の雨量レーダメッシュが跨る場合は、面積比にて該当するレーダメッシュの雨量が加重平均化される自動処理が働く。図 3-71 に雨量レーダの取込みイメージを示す。

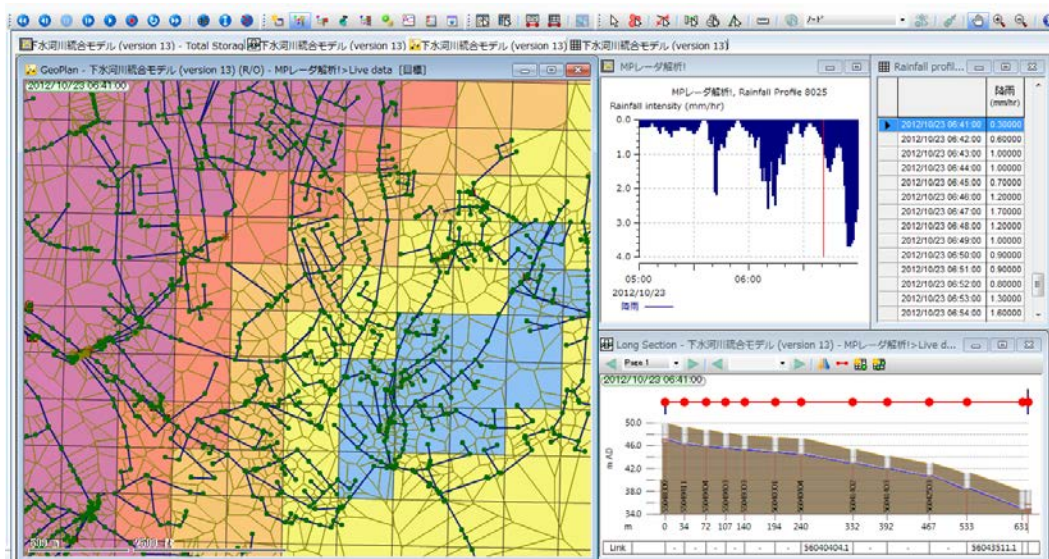
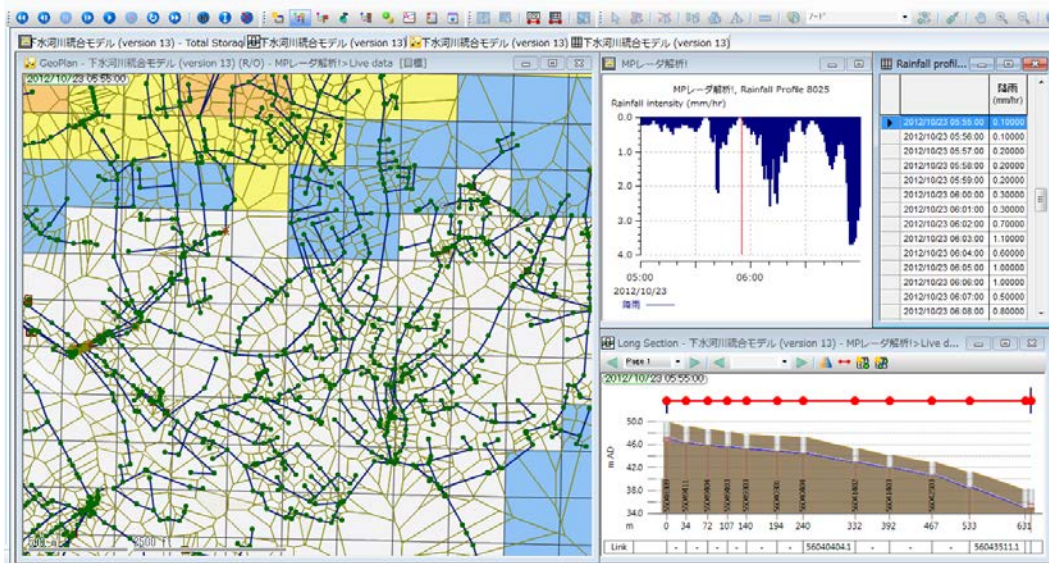


図 3-71 雨量レーダの取込みイメージ

3.5.2 オンライン解析とオフライン解析

オフライン解析であってもオンライン解析であっても、同じ解析エンジンを用いて指定された条件下で解析（計算）することには変わらない。しかしながら、オンライン解析では「解析時間の短縮」が必須条件であり、同じ解析エンジンを使用しつつ解析の時間を大幅に短縮する方法として「バッチ処理」の概念が用いられる。

「バッチ処理」とはオンライン解析において各タイムステップの解析計算に必要な解析の初期条件（値）を、過去の解析結果を基に予め且つ定期的に自動生成することである。

オンライン解析の場合は、「バッチ処理」で生成された初期条件（値）を基に全ての解析が実施されことにより、解析時間の大幅な短縮を実現している。「バッチ処理」で生成された初期条件（値）はステート（状態）ファイルとしてシステム内で識別・保管される。

以下に示す通り、オフライン解析は降雨を連続的に計算する（例えば 24 時間分）が、オンライン解析は 2 時間分（過去 1 時間、将来 1 時間）の降雨をバッチ処理により計算することで、計算時間が短くなる。

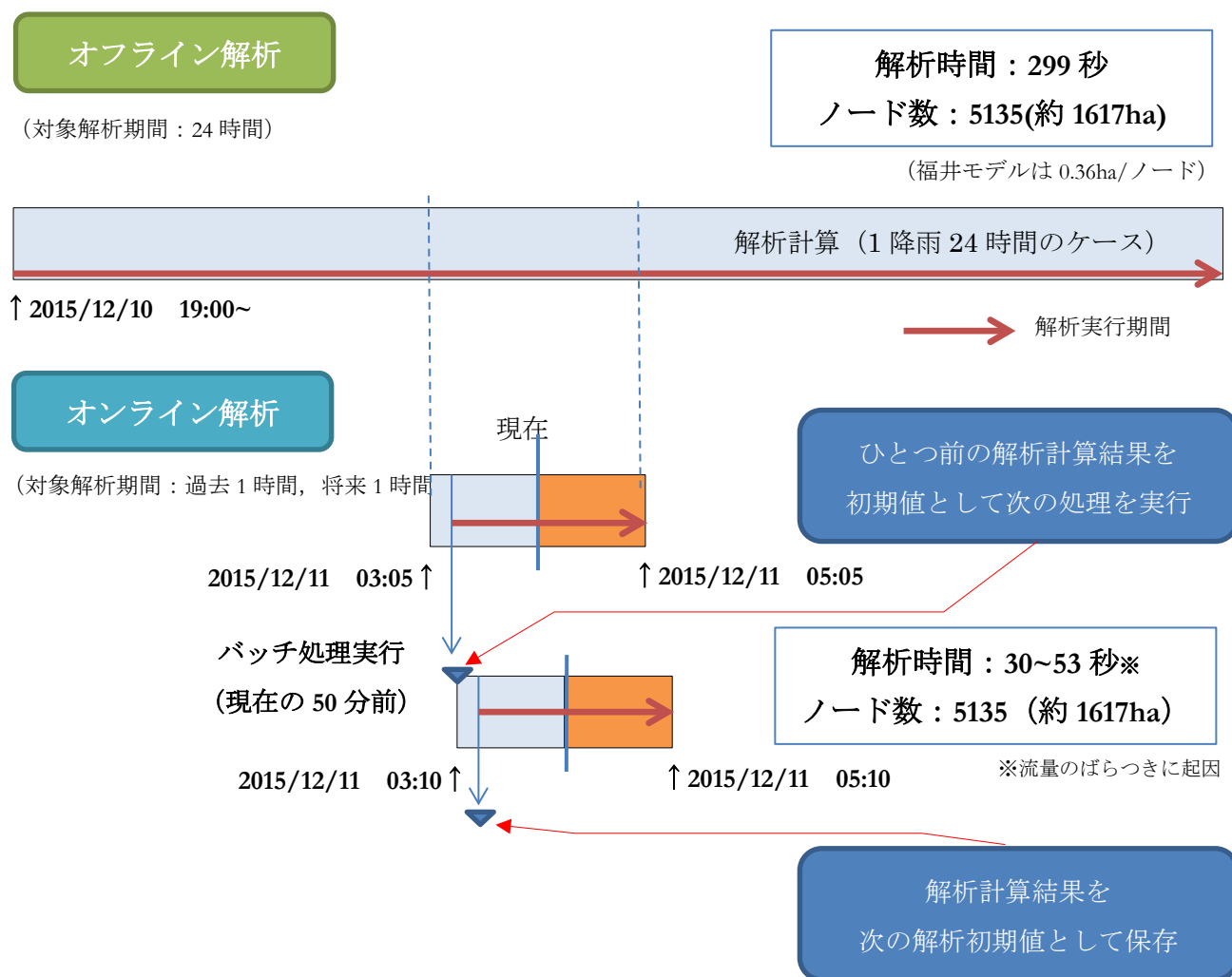


図 3-72 オンライン解析とオフライン解析の違い

3.5.3 流出解析精度評価

(1) 評価方法

1) 目的

流出解析モデルのパラメータ調整（キャリブレーション）を行い、降雨実測値による水位解析精度を確保する。

2) 性能・目標

流出解析では、精度の高い水位および浸水区域を確保するため、表 3-12 に示す性能目標値を設定した。

表 3-12 評価内容および方法

評価項目		性能目標	評価方法等
流出解析	流出解析精度	①管路内水位：NS が 0.7 以上 ②浸水発生位置，範囲，浸水深：概ね一致 ③浸水発生時間：概ね一致	実測値と解析値を比較 ※②③は，今回，浸水が発生する降雨が取得できなかったため，過去の浸水発生降雨にて評価する。

①管路内水位：NS が 0.7 以上

観測水位と実降雨による解析水位より、水位の整合性（ピーク水位の位置や時系列の水位変動・波形）について以下の指標を用いて比較評価し、精度評価を行なう。なお、自助のロードタイム確保や施設運転支援の精度確保の観点から、ハイドロの立ち上がりやピークの位置の整合性が重要であるため、NS(Nash-Sutcliffe 係数)を評価指標に採用する。

・ NS(Nash-Sutcliffe 係数) > 0.7

Nash-Sutcliffe 係数は、1970 年に (Nash and Sutcliffe, 1970) により提唱された指標であり値が 1 に近いほどモデルの精度はよいとされ、指標値 0 より小さい場合、ほぼ予測の効果がないとみなすことができる。一般的に 0.7 を超えると有効な精度であるとされている。

■ Nash-Sutcliffe 係数

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \{H_o(i) - H_c(i)\}^2}{\sum_{i=1}^N \{H_o(i) - H_{av}\}^2}$$

$$H_{av} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_o(i)$$

N : 計算時間数

$H_o(i)$: i 時の実測水位

$H_c(i)$: i 時の計算水位

H_{av} : 実測水位の平均値

※取りうる範囲 : 1.0 以下

※的中の値 : 1.0

※単位 : 無し

※評価基準 : (NS ≤ 0.7 : ○), (0.0 ~ 1.0 : △), (マイナス : ×)

流出解析技術は、水位や浸水範囲を予測する技術であるため、NS は流量ではなく、水位に対して評価を実施した。なお、検証対象管路は、「円形管の圧力流れ」および「開水路の自由水面流れ」であるため、水位と流量は比例関係にあり、流量による評価と水位による評価は同等の結果となる。また、NS の評価範囲は、水位の全体的な波形の整合性を確認するため、平常水位の立ち上がりから、ピーク水位より下降し平常水位に戻るまでの期間または水位が安定するまでとした。

②浸水発生位置，範囲，浸水深

実証研究では，浸水被害の発生する降雨が無かったため，過去の浸水被害記録より評価を行った。浸水実績記録の床上，床下浸水の記録とシミュレーションによる浸水範囲，浸水深とを比較し，同等以上を目標とした。

③浸水発生時間

実証研究では，浸水被害の発生する降雨が無かったため，過去の浸水被害記録より評価を行った。浸水発生時間は，過去の記録とシミュレーションによる浸水時間とを比較し，同等以上を目標とした。

3) 評価手順

流出解析モデルのパラメータ調整（キャリブレーション）を行い，降雨実測値による水位解析精度を確保する。管路内水位については，実測値と解析値を比較した。また，浸水発生位置，範囲，浸水深，発生時間については，実測値と解析値を比較した。

キャリブレーションとは，雨水の流出状況および浸水現象等の十分な再現性を確保するため，モデルの諸元・降雨損失・表面流出モデルのパラメータの調整を図り，現況の雨水流出挙動の再現化を図るものである。少なくとも3ケース程度の降雨時の水位観測値と解析値を相互に比較し，その整合性の確認により，都市域レーダに対応した高精度な流出解析モデルを構築する。キャリブレーションフローを図 3-73 に示す。

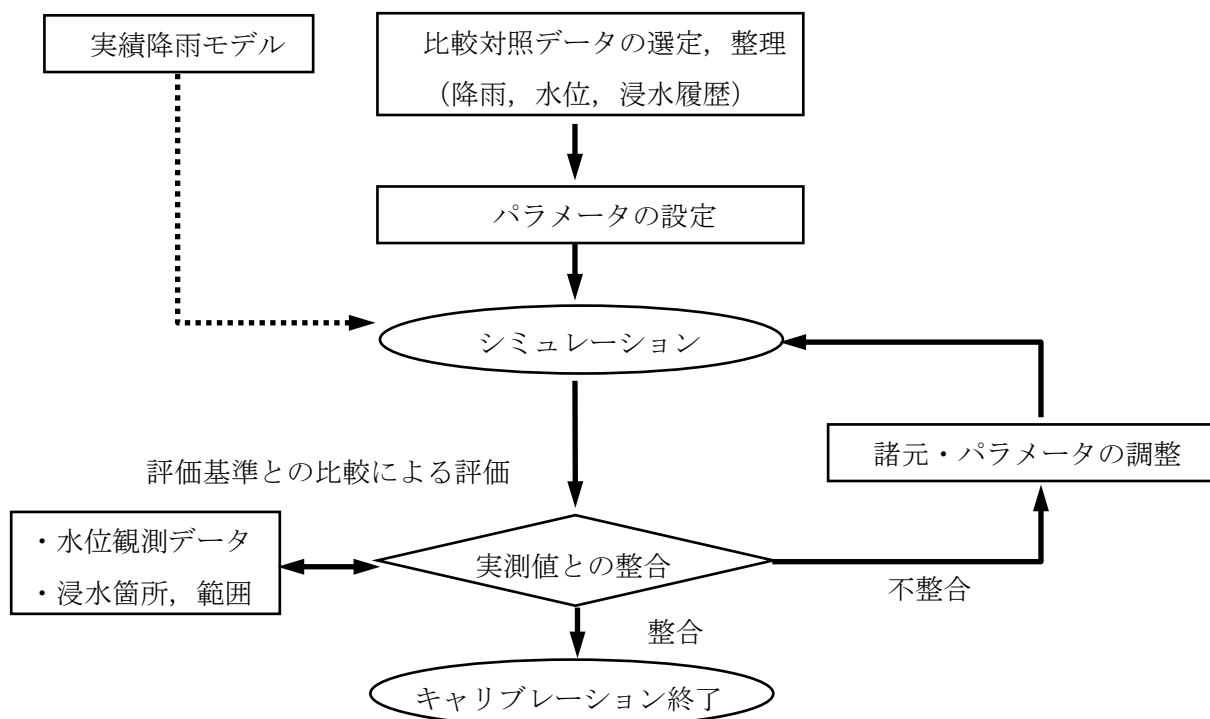


図 3-73 キャリブレーションフロー

4) パラメータの設定

降雨損失モデル，表面流出モデルのパラメータについて調整を図り，キャリブレーションを行う。パラメータはまずは，標準値を用い，その後パラメータを変動させ，評価対象降雨において水位のNS値が0.7以上確保できるパラメータ値を採用とした。

表 3-15 に本実証研究にて採用したパラメータ値を示す。

表 3-13 流出解析モデルのパラメータの概要

各パラメータの概要		概念図
降雨損失モデル	<p>■ 流出係数</p> <p>総流出流量やピーク流量が変化。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・大 → 流出流量が増加 ・小 → 流出流量が減少 <p>■ 流出係数の標準値</p> <ul style="list-style-type: none"> ・下水道計画における工種別基礎流出係数の平均値。 	
表面流出モデル	<p>■ 流出の遅れを表す係数</p> <p>総流出流量は変化無し。地表面からの流出速度（ピーク位置）が変化。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・大 → 流量のピークが上がる。 ・小 → 流量のピークが下がる。 <p>■ 流出の遅れを表す係数の標準値</p> <ul style="list-style-type: none"> ・不浸透面 : 1 ・浸透面 : 4 	

表 3-14 工種別基礎流出係数の標準値

工種別	流出係数 C	標準値 (平均値)
屋根	0.85~0.95	0.90
道路	0.80~0.90	0.85
その他の不透面	0.75~0.85	0.80
水面	1.00	1.00
間地	0.10~0.30	0.20
芝, 樹木の多い公園	0.05~0.25	0.15
こう配の緩い山地	0.20~0.40	0.30
こう配の急な山地	0.40~0.60	0.50

表 3-15 パラメータの初期設定値と最終設定値

No	工種	初期設定値		最終設定値	
		降雨損失モデル	表面流出モデル	降雨損失モデル	表面流出モデル
		流出係数	流出の遅れを表す係数	流出係数	流出の遅れを表す係数
1	屋根	0.90	1	0.95	1
2	道路	0.85	1	0.90	1
3	駐車場	0.85	1	0.90	1
4	水面	1.00	1	1.00	1
5	間地(計画区域)	0.20	4	0.35	2
6	間地(計画区域外)	0.20	4	0.20	3
7	畑	0.20	4	0.20	3
8	公園	0.15	4	0.25	3
9	山地	0.30	4	0.20	3

5) 実測調査

降雨時の雨水流出量は、種々の要因により変化し、地域による差が大きいため、対象流域においては、流出状況の実態を把握するために、実測調査を行うことが必要である。

実測調査結果は、流出解析モデルのキャリブレーションに必要であり、流域をモデル化する際の妥当性を判断する基となる。キャリブレーションにおいては、特定の時刻における解析値を実測値に合わせるのではなく、解析目的に応じて全体的な流出パターン、最大水位等の適合性に留意して実施する必要がある。

流出解析モデル作成上必要な主な水位データは、以下のものがある。

- ・管きよ内水位
- ・放流先水位（外水位）等

実証研究においては、上記最低限必要な条件を基に、当該フィールドの特性を考慮し、水位計の設置目的を表 1-18 に分類し、配置計画を行った。キャリブレーションにおける水位計設置箇所については、以下の点に留意し選定した。

- ・浸水常襲地域（浸水発生箇所における水位精度の確保が不可欠）
- ・上流，中流，下流点（上～下流域の流出特性を把握する。ただし，平坦地や土地地用に変化が無い地域においては，必要に応じて検討）

浸水範囲の確認は、監視カメラを活用することが望ましい。その際、浸水深も確認できるようにその構造配置位置の検討が必要である。

(2) 評価結果

1) 福井市

① 下水管路内水位

平成 28 年 4 月 1 日～11 月 30 日までの全降雨のうち、規模の大きい降雨より 5 降雨に対し評価を実施し、NS 値は、0.7 以上確保可能なモデルを構築した。下水管路内水位の評価結果を表 3-16 に、また代表的な水位計設置地点について NS 値の評価結果を図 3-74 から図 3-78 に示す。

なお、キャリブレーションはオフラインで行うため、設定値(水位)によりポンプ起動停止やゲートの開閉を再現している。このため、手動で操作を行う施設については観測値と解析値に相違が発生する可能性がある。NS 値の評価を行った降雨時にも以下に示すような理由で観測値と解析値が相違した。

・ 図 3-74 (平成 28 年 9 月 8 日)

足羽ポンプ場の遮集ポンプが稼働し、立矢新の系統に流入したため降雨終了後に観測水位が上昇したが、解析水位は足羽ポンプ場が稼働水位となっていなかったため上昇しなかった。

・ 図 3-76(平成 28 年 6 月 22 日, 7 月 13 日)

社雨水ゲート(閉まっているときは堰)が閉まっており、実際には初期条件で堰高まで水位が上がっているが、解析上では堰高まで水位が上昇するまで解析水位と相違が発生した。

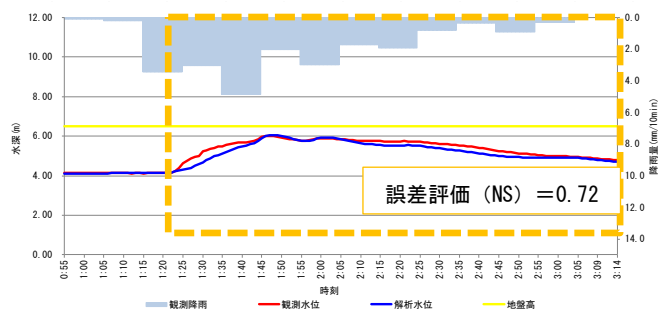
また、図 3-78(平成 28 年 6 月 22 日, 7 月 13 日, 8 月 20 日)では下北野貯留管のポンプ井における観測水位と解析水位を示しているが、ポンプ起動水位と管底に水位差があるため、ポンプ排水後に雨水が流入する際にポンプ井の水位が微増することがある。

表 3-16 下水管路内水位評価結果 (福井市)

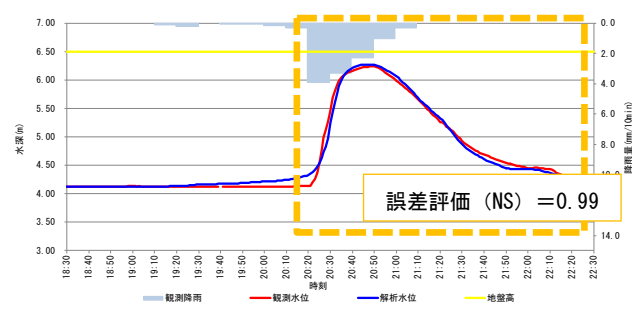
No	日付	NS 値				
		立矢新	貯留管内 月見みのり	山奥	社	管内 下北野貯留
①	平成 28 年 7 月 13 日	0.88	0.72	0.81	0.73	0.84
②	平成 28 年 10 月 9 日	0.72	0.73	0.73	0.77	0.71
③	平成 28 年 8 月 20 日	0.99	0.81	0.79	0.91	0.74
④	平成 28 年 9 月 8 日	0.91	0.72	0.70	0.92	-
⑤	平成 28 年 6 月 22 日	0.88	0.92	0.77	0.74	0.79

— : 貯留管への流入なし

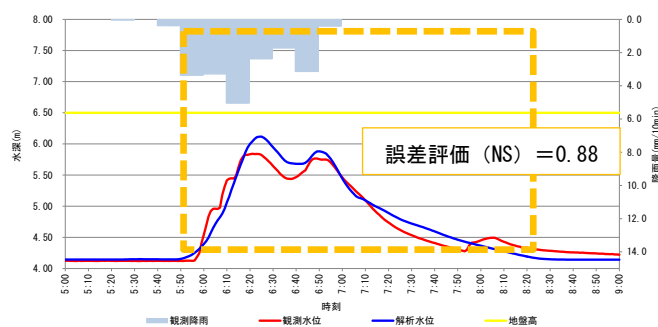
平成 28 年 10 月 9 日降雨



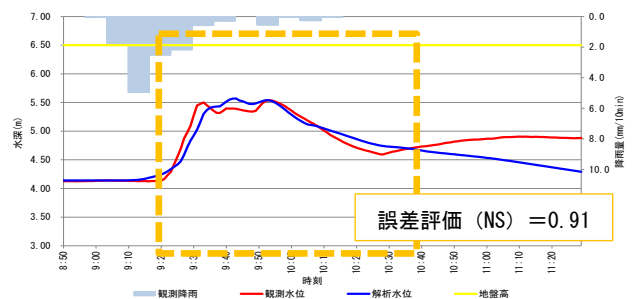
平成 28 年 8 月 20 日降雨



平成 28 年 7 月 13 日降雨



平成 28 年 9 月 8 日降雨



平成 28 年 6 月 22 日降雨

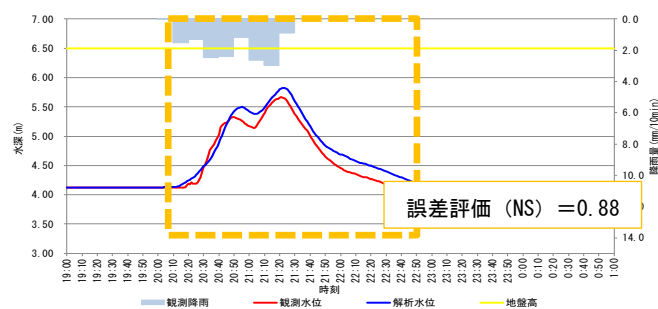
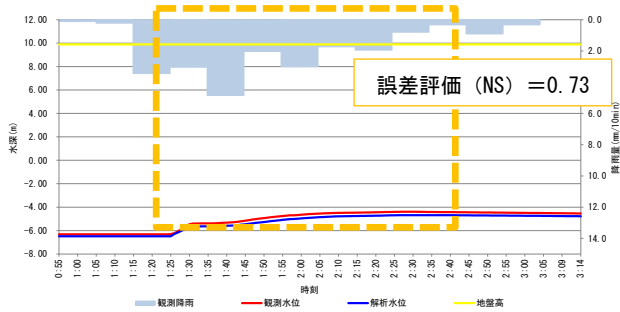
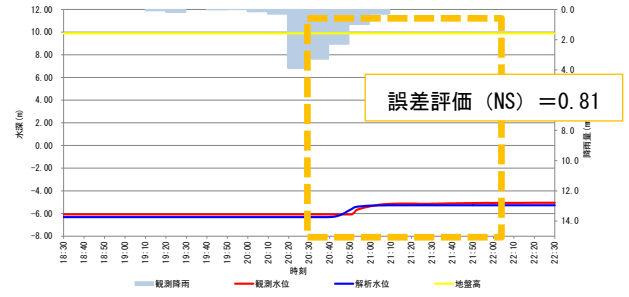


図 3-74 NS 値の評価結果 (立矢新)

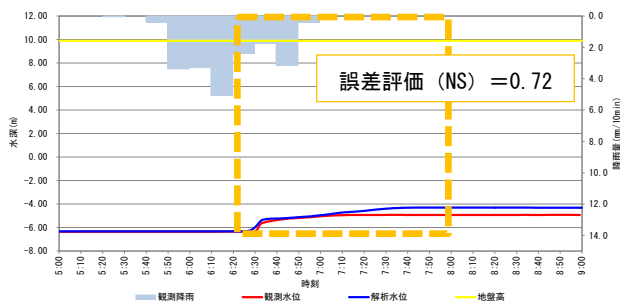
平成 28 年 10 月 9 日降雨



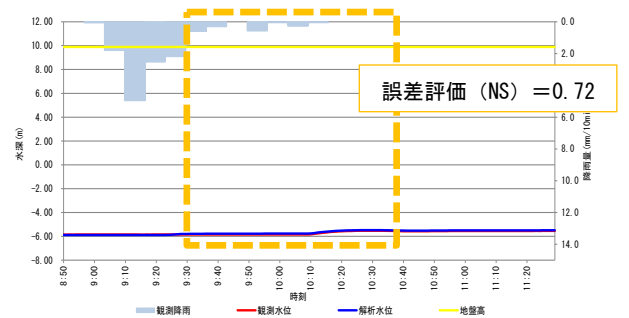
平成 28 年 8 月 20 日降雨



平成 28 年 7 月 13 日降雨



平成 28 年 9 月 8 日降雨



平成 28 年 6 月 22 日降雨

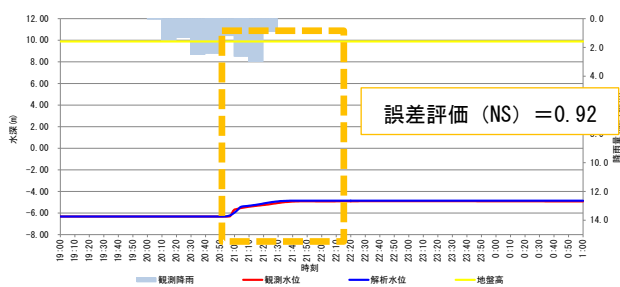
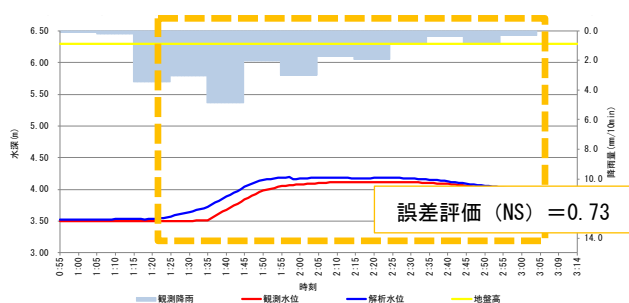
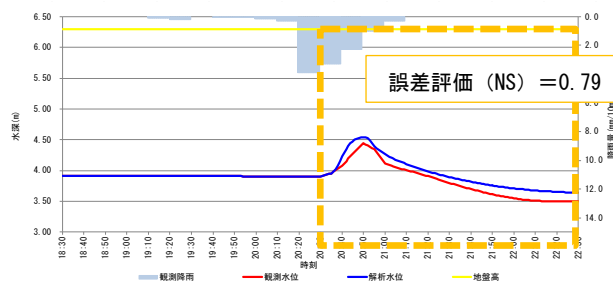


図 3-75 NS 値の評価結果 (月見みのり貯留管内)

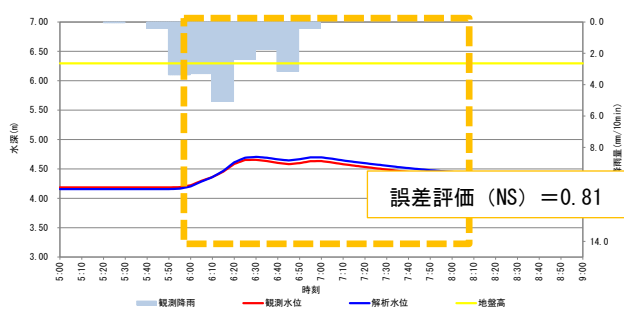
平成 28 年 10 月 9 日降雨



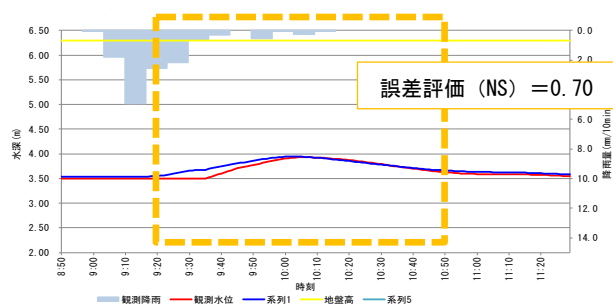
平成 28 年 8 月 20 日降雨



平成 28 年 7 月 13 日降雨



平成 28 年 9 月 8 日降雨



平成 28 年 6 月 22 日降雨

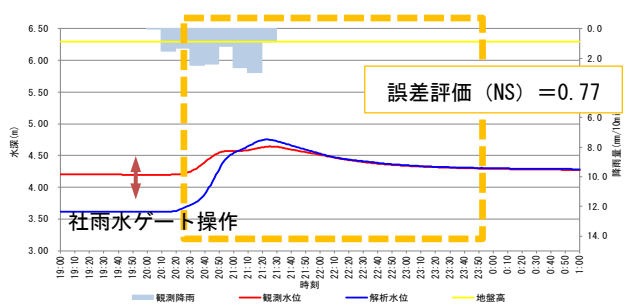
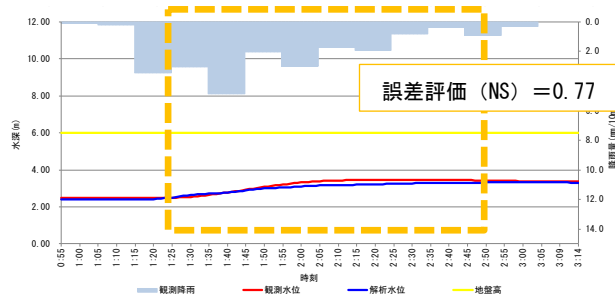
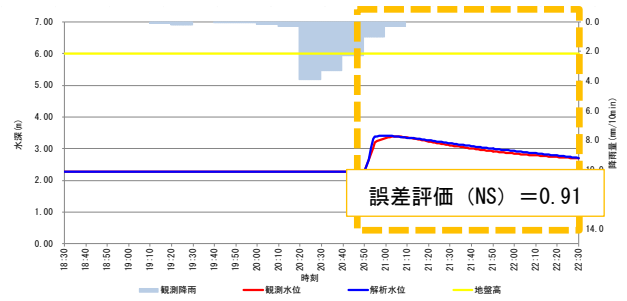


図 3-76 NS 値の評価結果 (山奥)

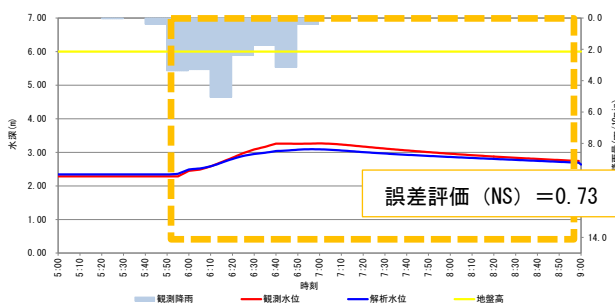
平成 28 年 10 月 9 日降雨



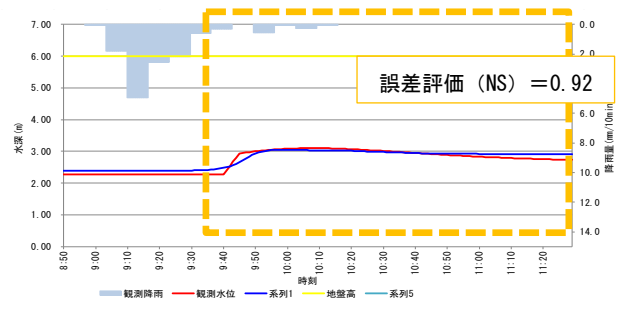
平成 28 年 8 月 20 日降雨



平成 28 年 7 月 13 日降雨



平成 28 年 9 月 8 日降雨



平成 28 年 6 月 22 日降雨

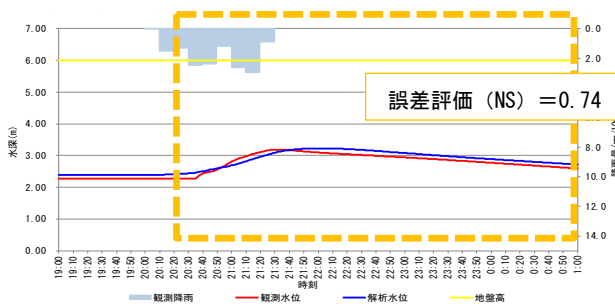
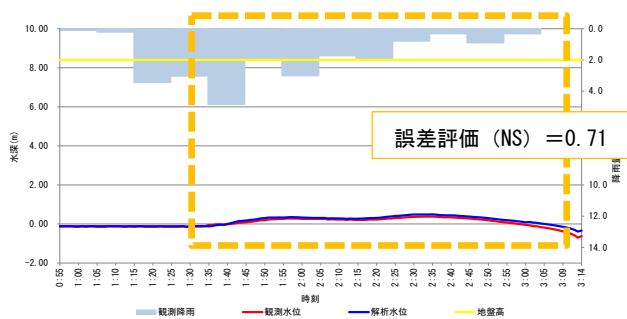
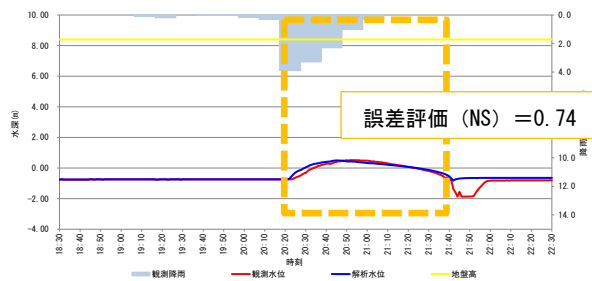


図 3-77 NS 値の評価結果 (社)

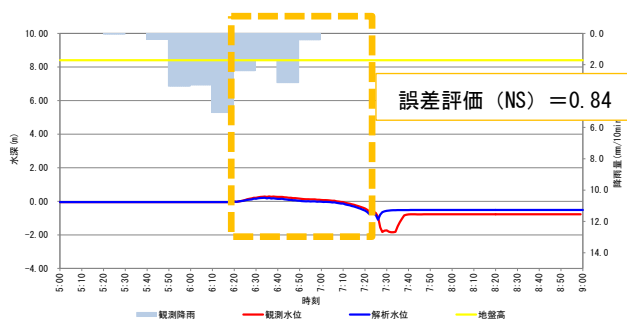
平成 28 年 10 月 9 日降雨



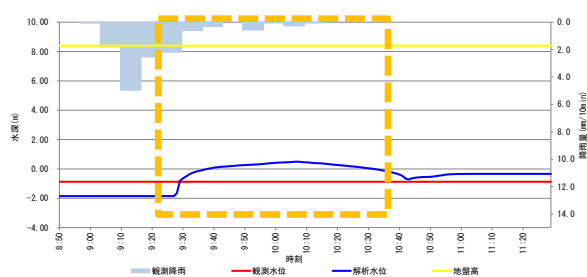
平成 28 年 8 月 20 日降雨



平成 28 年 7 月 13 日降雨



平成 28 年 9 月 8 日降雨



※貯留管への流入なし

平成 28 年 6 月 22 日降雨

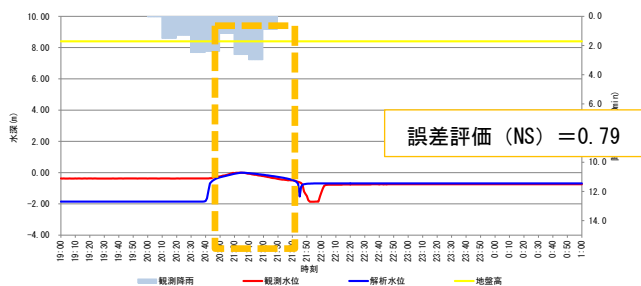


図 3-78 NS 値の評価結果 (下北野貯留管内)

②浸水発生位置，範囲，浸水深

実証期間中は浸水被害が発生しなかったため，過去，浸水発生日のシミュレーション結果と記録とを比較し，精度を評価することとした。記録には，住民からの電話などの時間を併記した通報記録，消防などの出動及び活動記録，職員の現地調査記録，浸水解消後の住民聞き取り調査記録や壁に付着したごみなどから水位を記録する現場調査記録などがある。

対象は，福井市で近年発生した，比較的記録の多く残る平成 24 年 9 月 6 日(時間最大 43.1mm/h)降雨とし，配備浸水調査報告書，大雨による作業報告書及び聞き取り調査報告書から，記録の残る特定の地域を抽出したうえで，シミュレーション結果の浸水発生位置，範囲，浸水深の妥当性を評価した。

浸水発生位置及び範囲の実績とシミュレーション結果を，**図 3-79**，**図 3-80** に示す。円で囲んだエリアの浸水範囲及び浸水深は，概ね実績と整合していることを確認した。

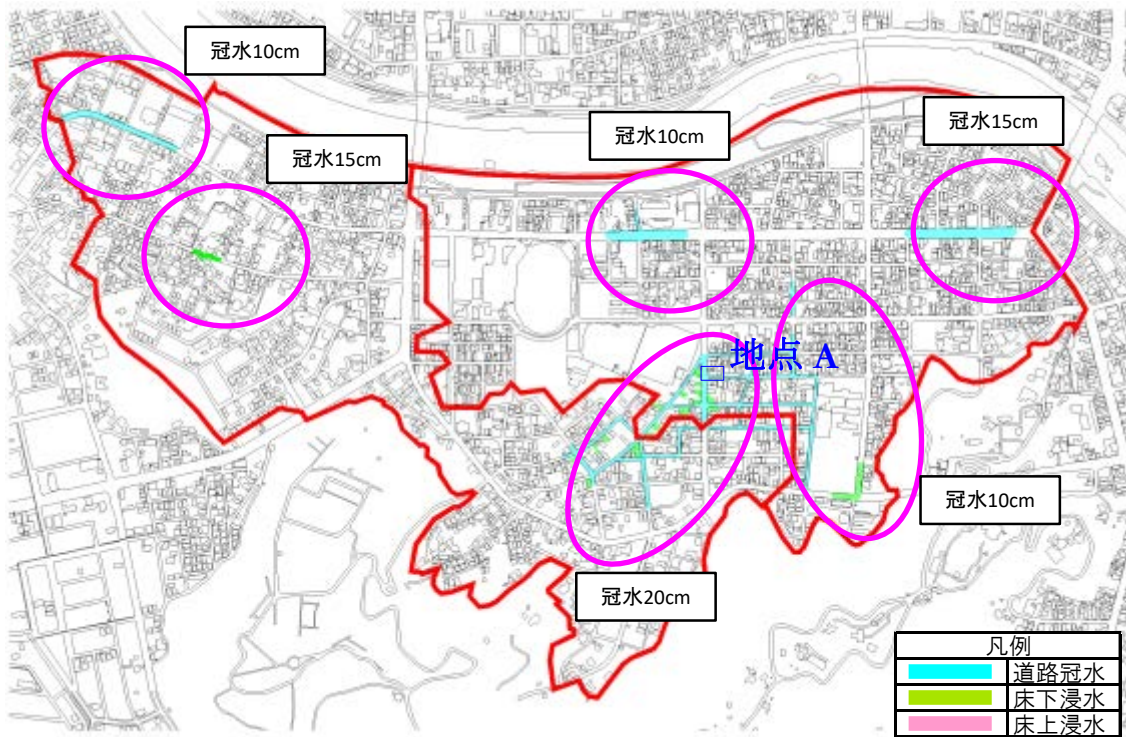


図 3-79 浸水実績（平成 24 年 9 月 6 日降雨）

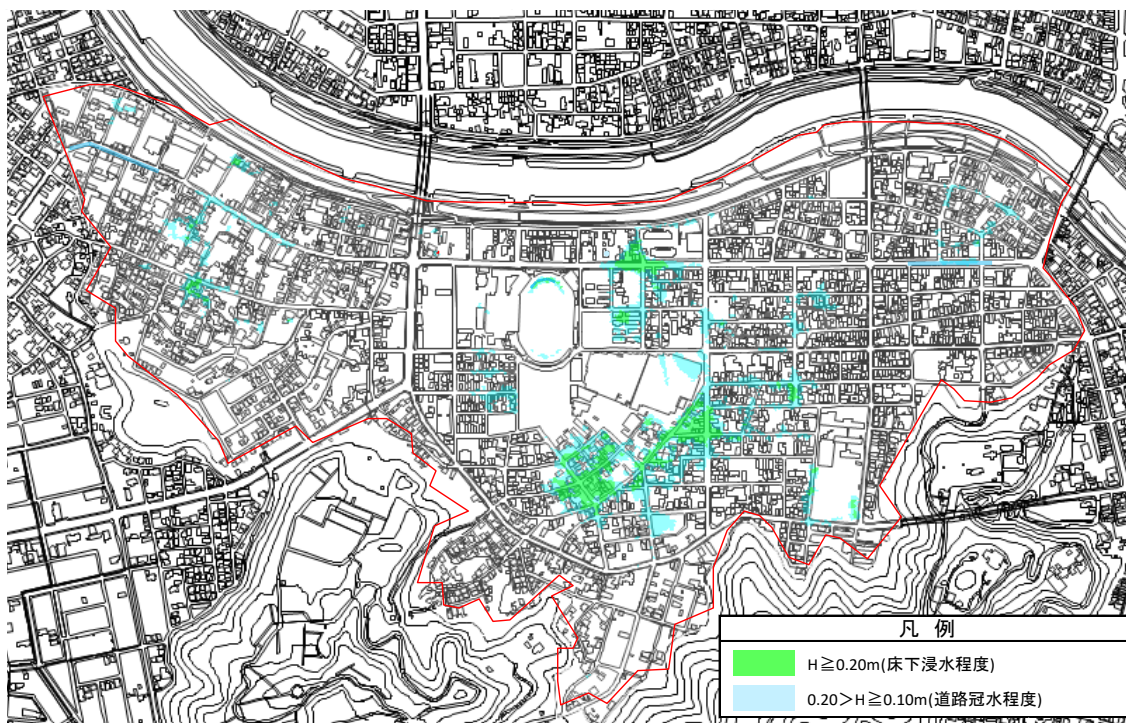


図 3-80 シミュレーション結果（平成 24 年 9 月 6 日）

③浸水発生時間

時間と浸水深に関するシミュレーション結果の妥当性を評価した結果を、図 3-81 に示す。これは、住民からの通報記録の残る、図 3-79 の地点 A における水位のシミュレーション結果と記録とを比較したもので、道路冠水の始まった 6:55 分の水位と、9:00 頃の水位は、どちらもほぼ一致していることがわかる。

このように過去の浸水実績からシミュレーション結果の妥当性やキャリブレーションを行う必要があるため、浸水常襲地区の特定、監視カメラの設置や、浸水発生時には、上記のような記録をできる限り多く正確に残し、報告書として取りまとめておくといよい。

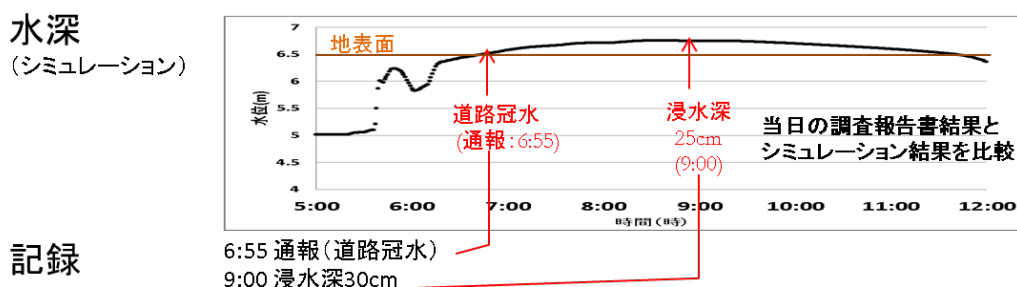


図 3-81 地点 A における時間及び浸水深の記録

2) 富山市

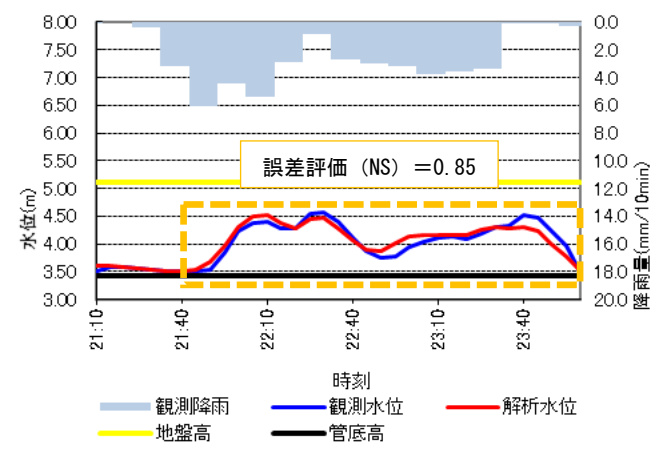
①下水管路内水位

平成 28 年 4 月 1 日～11 月 30 日までの全降雨のうち、規模の大きい降雨より 5 降雨に対し評価を実施した。対象降雨時の各地点における流出解析精度評価結果を下表に示す。全ての対象において、NS が 0.7 を超えており、流出解析モデルの再現性は高いと言える。

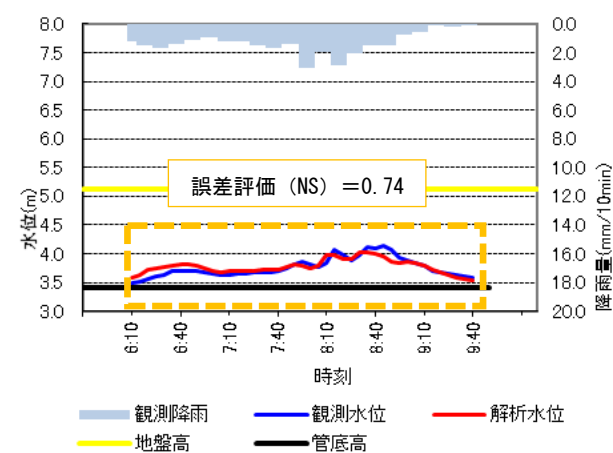
表 3-17 下水管路内水位評価結果（富山市）

No	日付	NS 値			
		呉羽 新富田町	茶屋町	呉羽苑	呉羽 富田町
①	平成 28 年 7 月 26 日	0.85	0.72	0.81	0.83
②	平成 28 年 9 月 18 日	0.74	0.73	0.75	0.73
③	平成 28 年 7 月 13 日	0.86	0.74	0.78	0.76
④	平成 28 年 7 月 13 日	0.91	0.74	0.74	0.74
⑤	平成 28 年 8 月 9 日	0.70	0.70	0.72	0.71

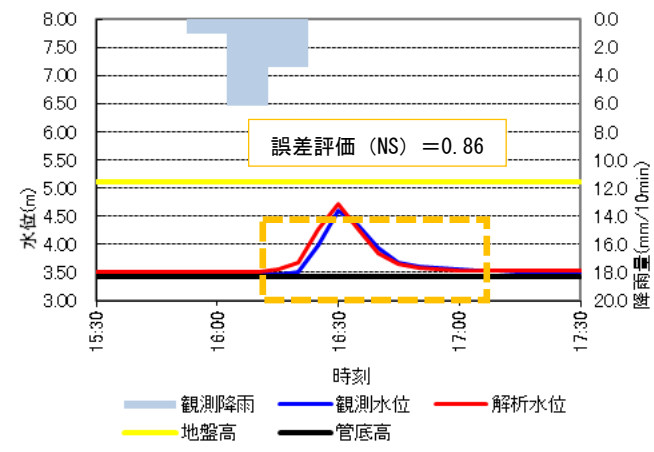
①平成 28 年 7 月 26 日降雨



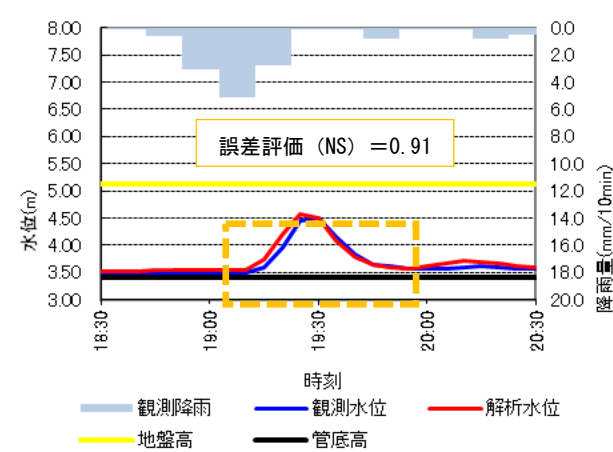
②平成 28 年 9 月 18 日降雨



③平成 28 年 7 月 13 日降雨



④平成 28 年 7 月 13 日降雨



⑤平成 28 年 8 月 9 日降雨

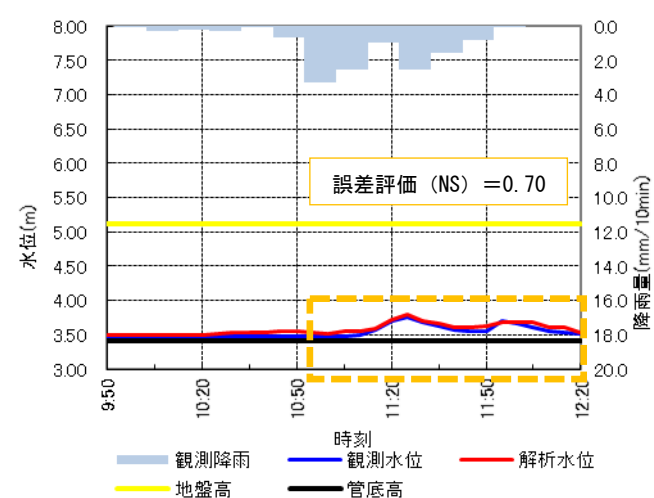
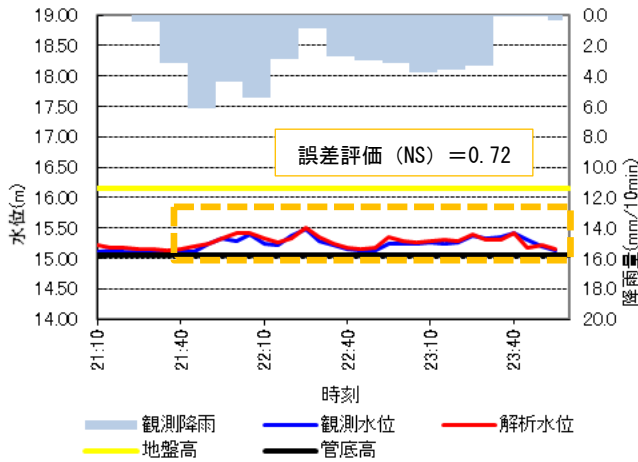
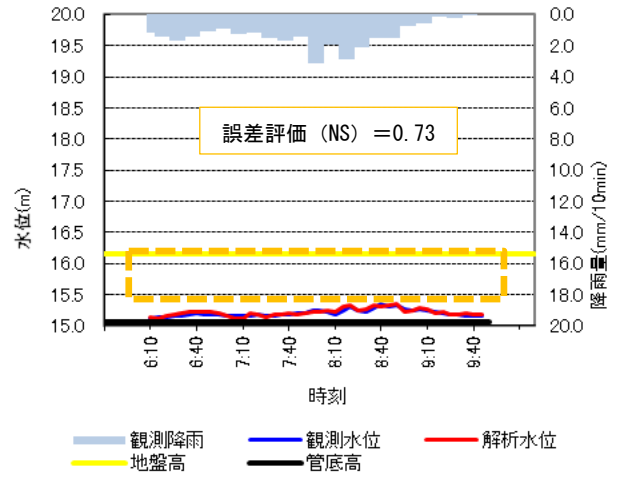


図 3-82 NS 値の評価結果 (呉羽新富田町)

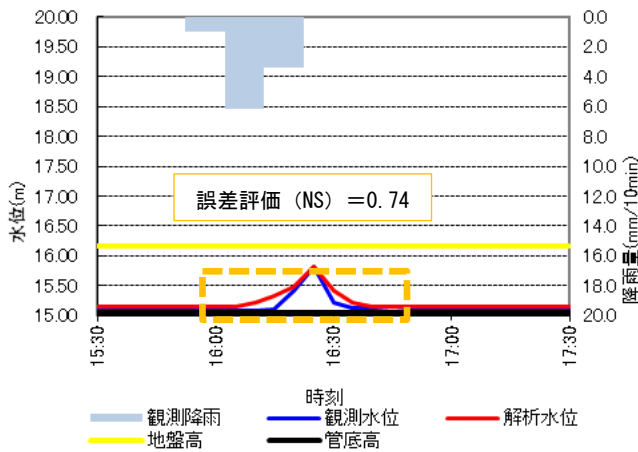
①平成 28 年 7 月 26 日降雨



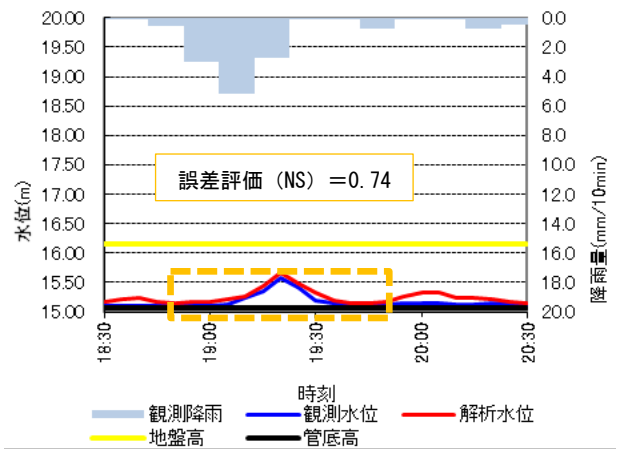
②平成 28 年 9 月 18 日降雨



③平成 28 年 7 月 13 日降雨



④平成 28 年 7 月 13 日降雨



⑤平成 28 年 8 月 9 日降雨

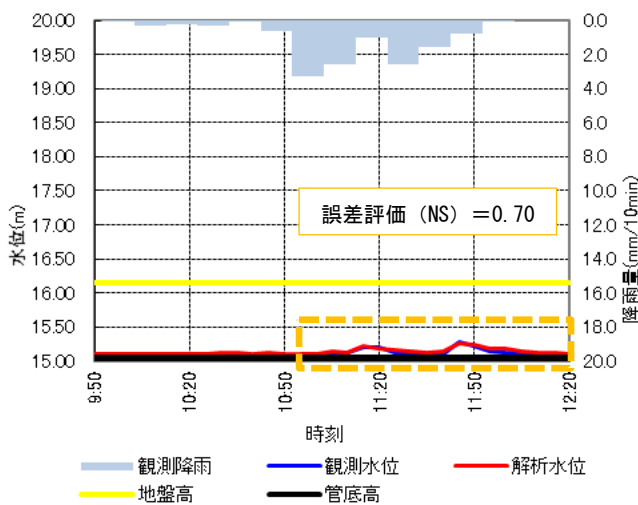
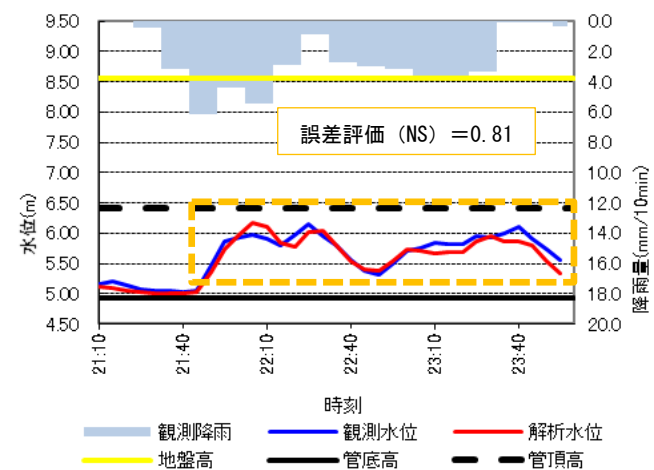
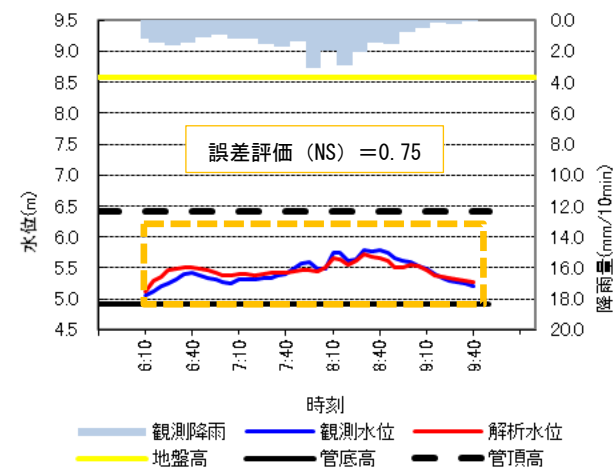


図 3-83 NS 値の評価結果 (茶屋町)

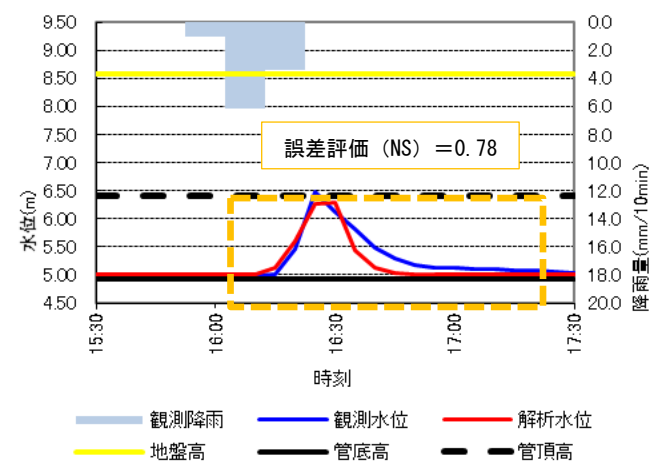
①平成 28 年 7 月 26 日降雨



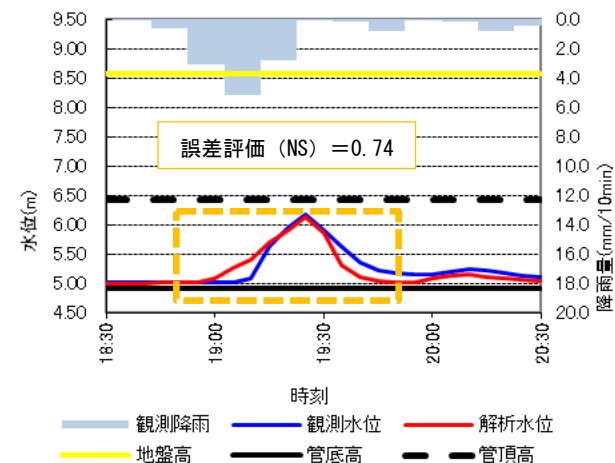
②平成 28 年 9 月 18 日降雨



③平成 28 年 7 月 13 日降雨



④平成 28 年 7 月 13 日降雨



⑤平成 28 年 8 月 9 日降雨

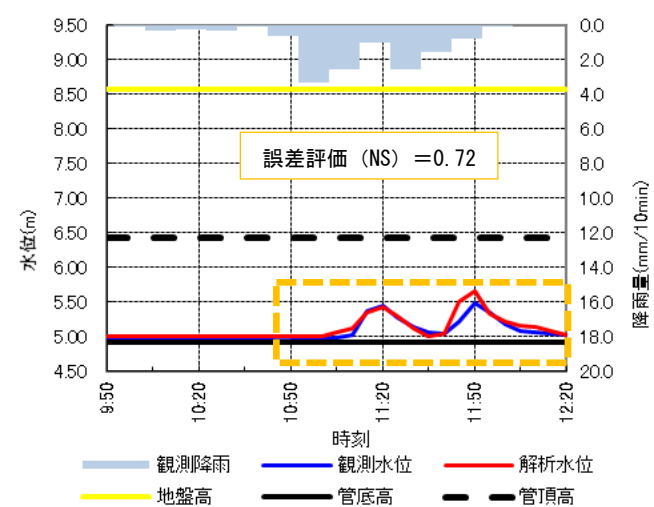
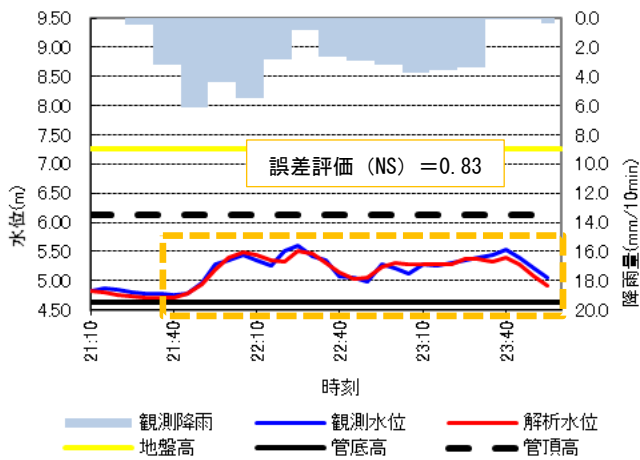
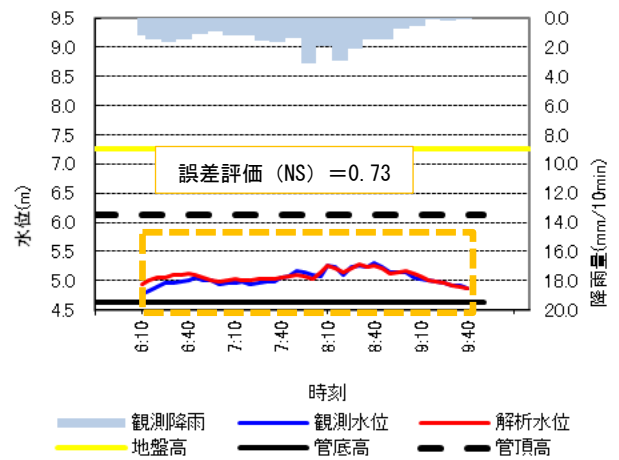


図 3-84 NS 値の評価結果 (吳羽苑)

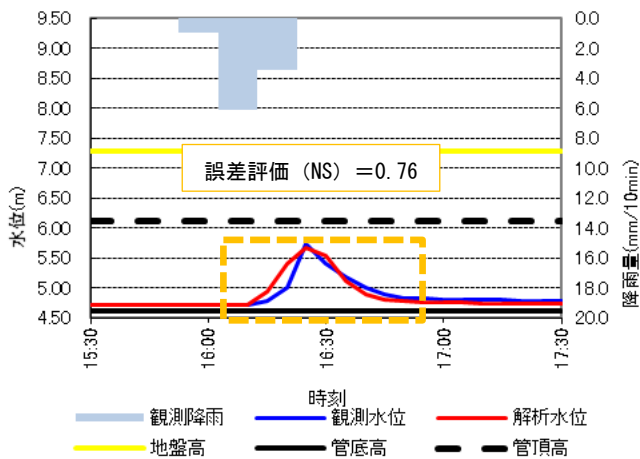
①平成 28 年 7 月 26 日降雨



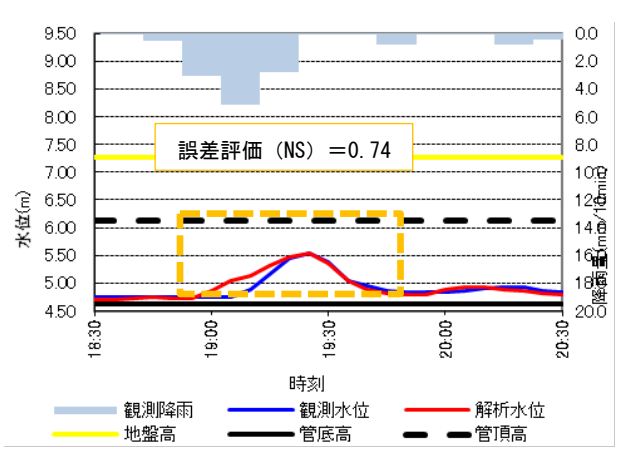
②平成 28 年 9 月 18 日降雨



③平成 28 年 7 月 13 日降雨



④平成 28 年 7 月 13 日降雨



⑤平成 28 年 8 月 9 日降雨

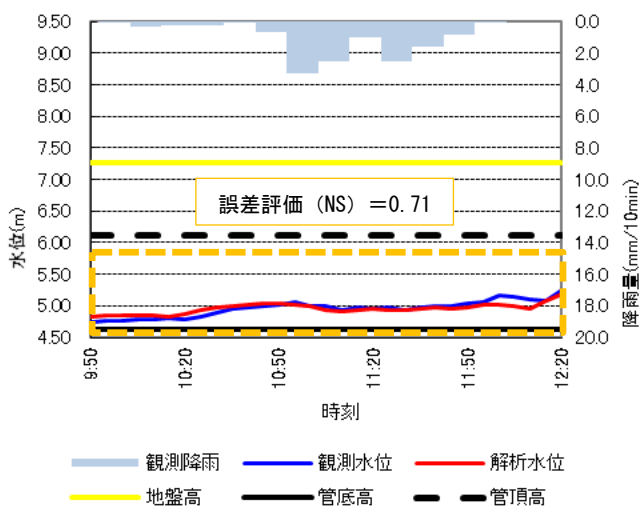


図 3-85 NS 値の評価結果 (呉羽富田町)

②浸水発生位置、範囲

実証期間中は、浸水被害が発生しなかったため、過去の浸水実績より、比較評価を行った。対象は、明確な浸水実績の記録のある平成16年7月25日(時間最大50.5mm/h)とし、近傍の富山地方気象台の地上量計を用いたシミュレーションを行い、結果の浸水発生位置、範囲、浸水深の妥当性を評価した。

浸水発生位置および範囲の実績と、シミュレーション結果を図3-86、図3-87に示す。浸水深0.1m以上の位置(円で囲んだエリア)が、概ね一致していることを確認した。

ただし、上記評価結果は、排水区直上の地上雨量計やレーダ雨量計ではないため、参考値とする。なお、浸水発生位置や範囲、浸水深等の浸水実績との整合性確認においては、地元住民への聞き取りや、監視カメラによりその範囲を特定していくことが望ましい。

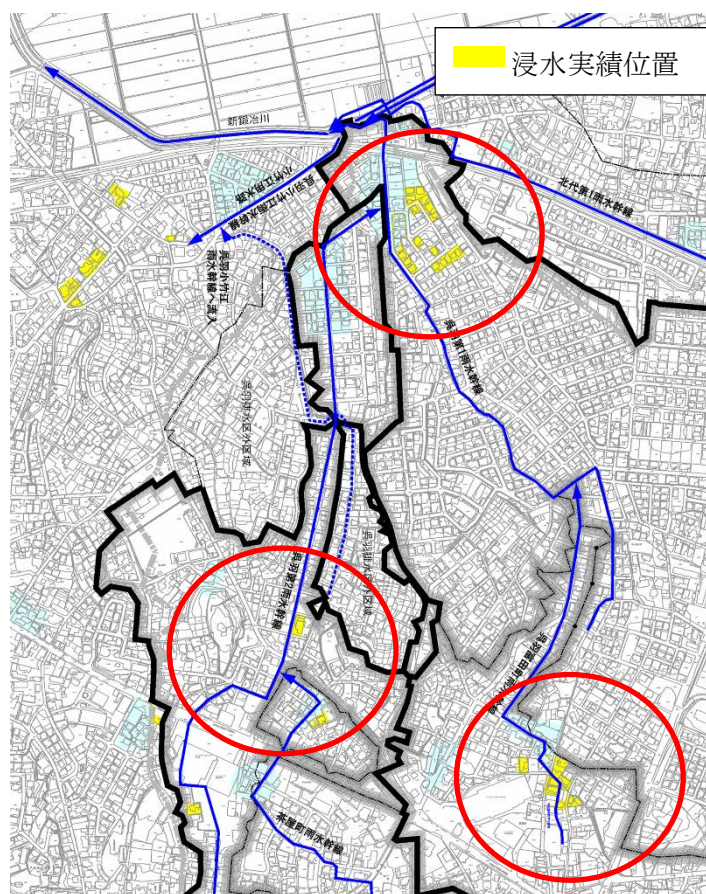


図 3-86 浸水実績

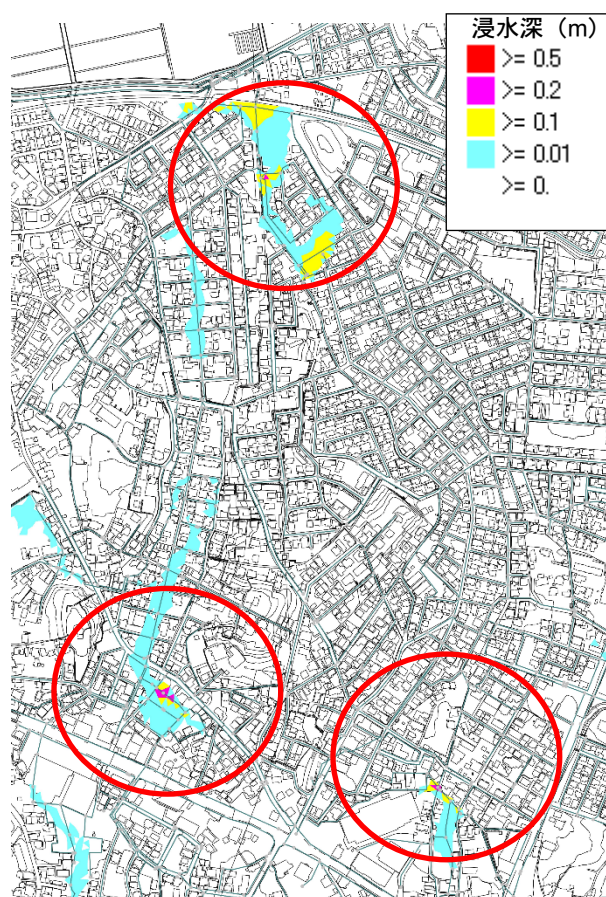


図 3-87 浸水解析図

③浸水発生時間

浸水発時間については、浸水時の水位記録等が無いため、評価対象外とした。

3.5.4 施設運転支援および自助・共助支援に有効な予測パターンの選定

(1) 評価方法

1) 目的

予測には誤差がかならず含まれることから、予測パターンの選定においては、予測値の誤差、空振りが発生する可能性、安全側をどこまで見込むか、などの要素について検討し、目的に応じた予測パターンを選定する必要がある。ここでは、施設運転支援および自助・共助支援に有効な降雨予測パターンの選定を行うことを目的とする。

2) 性能・目標

前述の降雨予測精度の評価結果より、降雨予測精度が実測値に近い値となる「移流」とプラス方向の誤差となる「特異最大」について表 3-18 のとおり評価を行い、施設運転支援および自助・共助支援に適切な予測パターンであることを確認する。

表 3-18 性能目標と評価方法

項目	性能目標	評価方法
施設運転支援	水位立ち上がり～ピーク水位までの期間で、予測精度が高いこと (RMSE が小さいこと)	移流と特異最大における水位実測値と予測値の差を比較
自助・共助支援	必要とするリードタイムが確保できること	移流と特異最大の水位予測値に基づき算出したリードタイムを比較

3) 評価手順

①施設運転支援

水位立ち上がりからピーク水位までの期間で、実測値と予測の RMSE を計測し、比較した。

②自助・共助支援

住民が必要とする自助・共助活動時間を確保するため、住民に対するアンケート調査やヒアリング等から、必要なリードタイムを設定した。

(a)リードタイムの定義

気象庁では、リードタイムを「警報・注意報を発表してから基準を超える現象が発生するまでの時間¹⁶⁾」と定義している。気象庁の定義を参考に実証技術におけるリードタイムは以下のとおり定義する。

「気象庁におけるリードタイム」 =

「基準を超える現象が発生した時間」 - 「警報・注意報を発表した時間」

「実証技術におけるリードタイム」 =

「浸水が発生した時間」 - 「浸水予測情報を配信した時間」

なお、最大 30 分後予測とした場合には、解析処理とメール送信に 5 分かかるため、情報活用者における予測時間としては最大 25 分となる。システム内の予測時間と情報活用者側の予測情報の時間の考え方について図 3-88 に示す。

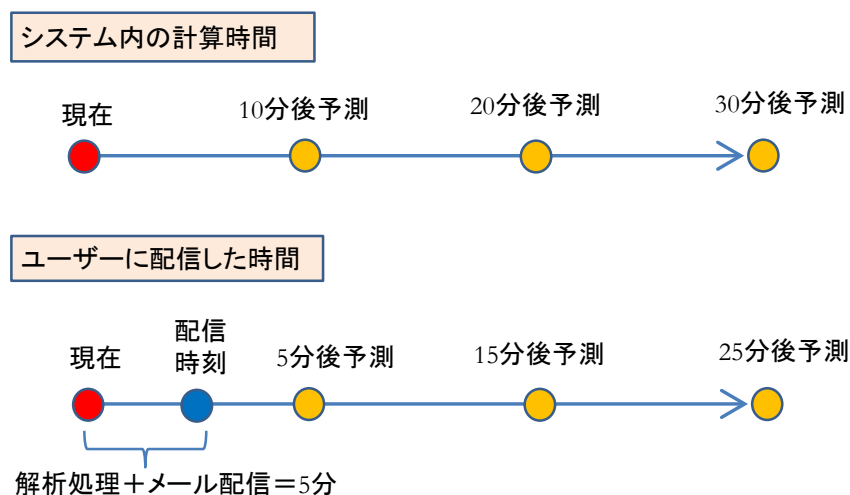


図 3-88 配信時間の考え方

(b)必要なリードタイム

必要なリードタイムは、住民アンケート調査結果から設定することが望ましいが、表 3-19 に示す所要時間を目安に設定することも可能とする。実証研究では、住民アンケート調査結果から住民が必要とするリードタイムを 20 分と設定した。

表 3-19 自助・共助対応の所要時間（実証研究による調査結果）

活動内容	所要時間	備考
土のうの設置	15 分	3 段設置（1 段当り 10 袋）
止水板の設置	10 分	準備, 取り付け
自動車移動	5 分	最大移動距離 200m

(c) リードタイムの確認方法

住民が必要とするリードタイムの確保と、実証技術の予測性能確認(最大 25 分後予測精度確認)を目的としたリードタイムを設定した。

本来は、地表面を超える降雨イベントを対象に評価を行うが、実証期間中に地表面を超える降雨イベントが発生しなかった。そのため、選定した 5 降雨のピーク水位に対して評価を行った。

(d) 住民側から見たリードタイム

住民が期待する自助・共助活動に必要な時間を確保出来ることを確認して、実証技術の性能を評価する目的で設定したリードタイム。

25 分 \geq 「浸水が発生した時刻」 - 「浸水予測情報を配信した時刻」 \geq 20 分

(e) 配信側（実証技術の予測精度）から見たリードタイム

実証技術の予測精度の確認を目的に設定したリードタイム。

25 分 \geq 「浸水発生を予測した時刻」 - 「浸水予測情報を配信した時刻」 \geq 20 分

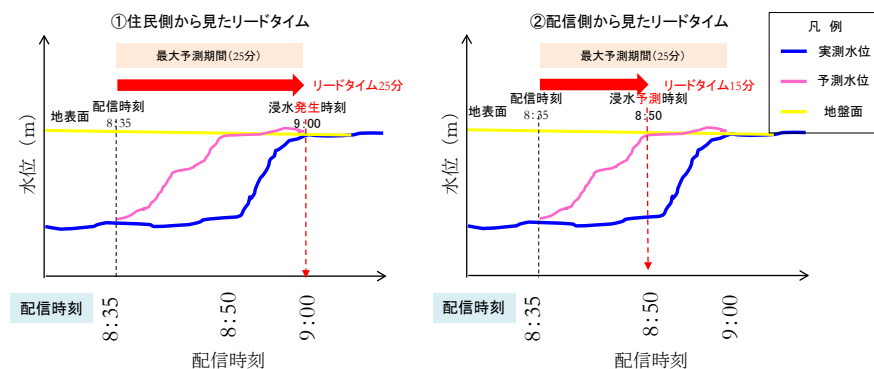


図 3-89 リードタイムの確認

(2) 評価結果

1) 福井市の評価事例

①施設運転支援（予測精度誤差の確認）

施設運転を行うためにはできるだけ精度の高い予測が要求されるため、それぞれのパターンについて各予測時刻における予測水位と実測水位の誤差を RMSE により評価した。なお、評価期間は水位の立ち上がりからピーク水位までとし、実際に施設運転に必要となる山奥の水位計を対象とした。評価結果を表 3-20 に示す。

ほとんどの予測時刻において特異最大にくらべ移流の予測誤差が小さい結果となったことから、施設運転支援においては移流モデルが適していると考えられる。

表 3-20 RMSE 評価結果

検討ケース	5 分後予測の RMSE (m)	
	移流	特異最大
7 月 13 日	0.15	0.53
10 月 9 日	0.07	0.62
8 月 20 日	0.04	0.23
9 月 8 日	0.12	0.33
6 月 22 日	0.04	0.24
平均	0.08	0.39

②自助・共助支援（リードタイム確保の確認）

移流と特異最大の水位予測値に基づきリードタイムを算出した結果、リードタイムを確保出来たケースが移流（1ケース）、特異最大（2ケース）と、特異最大がリードタイムを確保できるケースが多かった。

表 3-21 リードタイム評価結果（移流）

降雨イベント		①	②	③	④	⑤
		7/13	10/9	8/20	9/8	6/22
住民側から見た リードタイム	時間	16分	0分	25分	18分	0分
配信側から見た リードタイム	時間	14分	0分	13分	2分	0分

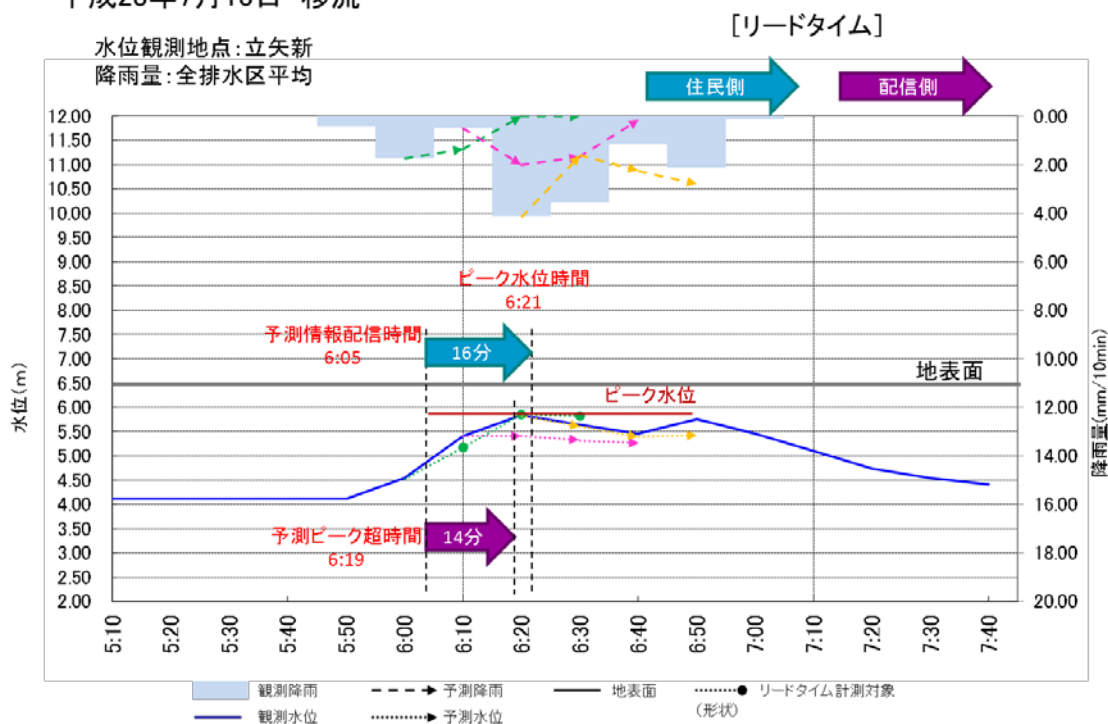
表 3-22 リードタイム評価結果（特異最大）

降雨イベント		①	②	③	④	⑤
		7/13	10/9	8/20	9/8	6/22
住民側から見た リードタイム	時間	16分	22分	25分	18分	16分
配信側から見た リードタイム	時間	11分	9分	13分	3分	8分

次頁以降に福井市の評価事例を示す。

福井

平成28年7月13日 移流



福井

平成28年7月13日 特異最大

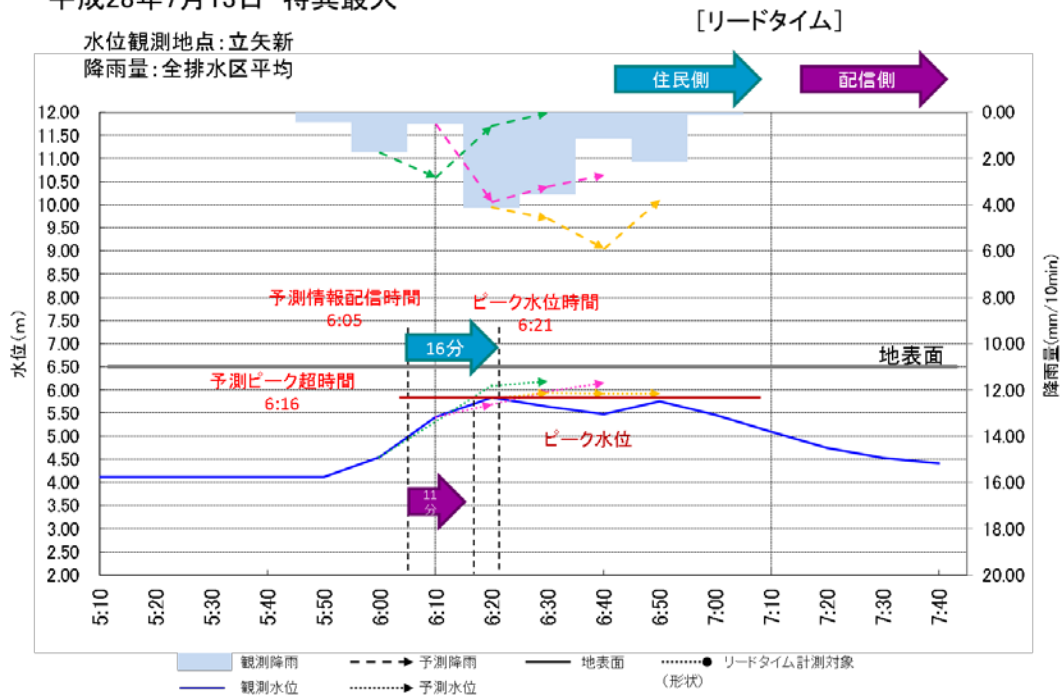


図 3-90 評価事例 (福井市 平成 28 年 7 月 13 日)

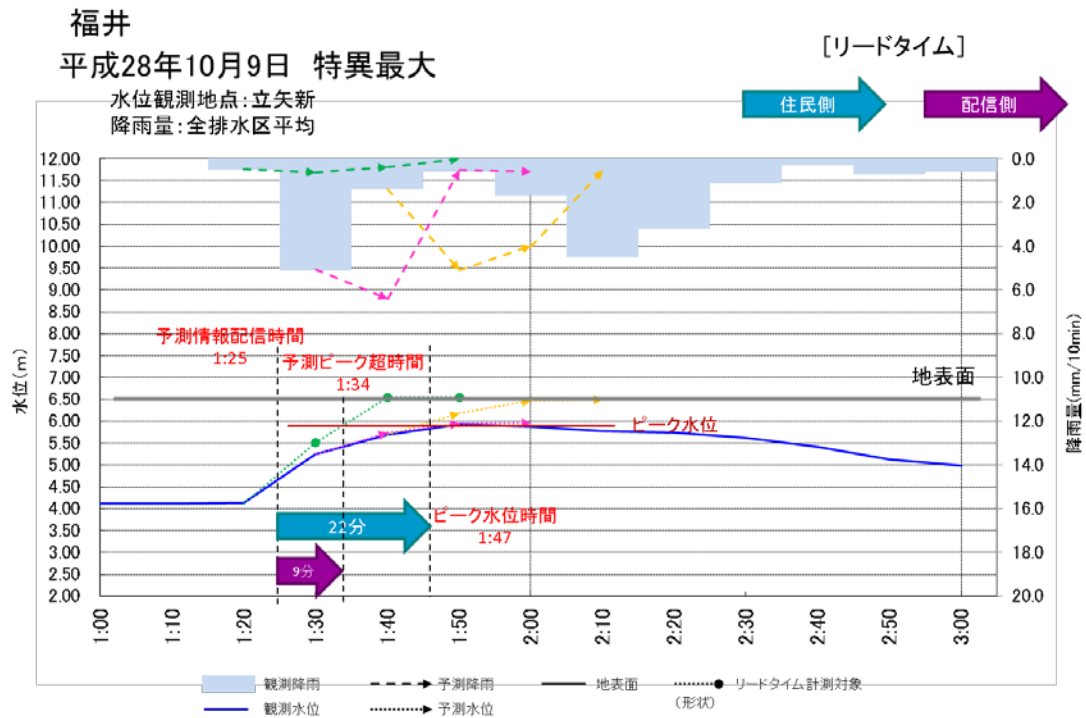
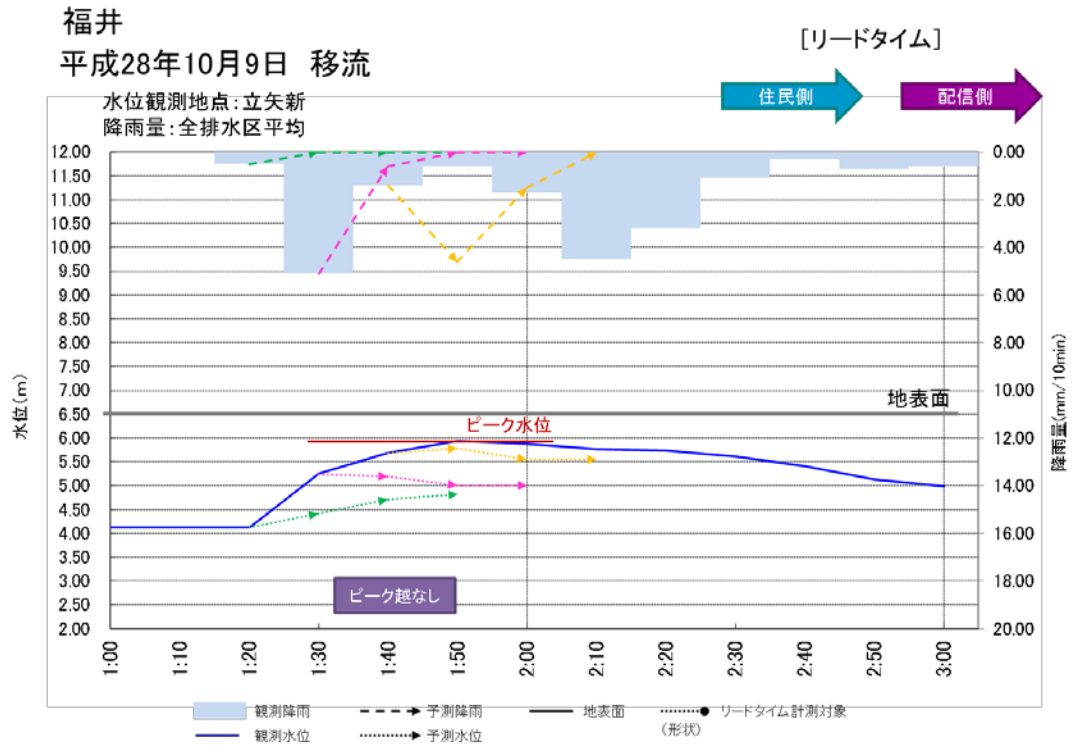


図 3-91 評価事例 (福井市 平成 28 年 10 月 9 日)

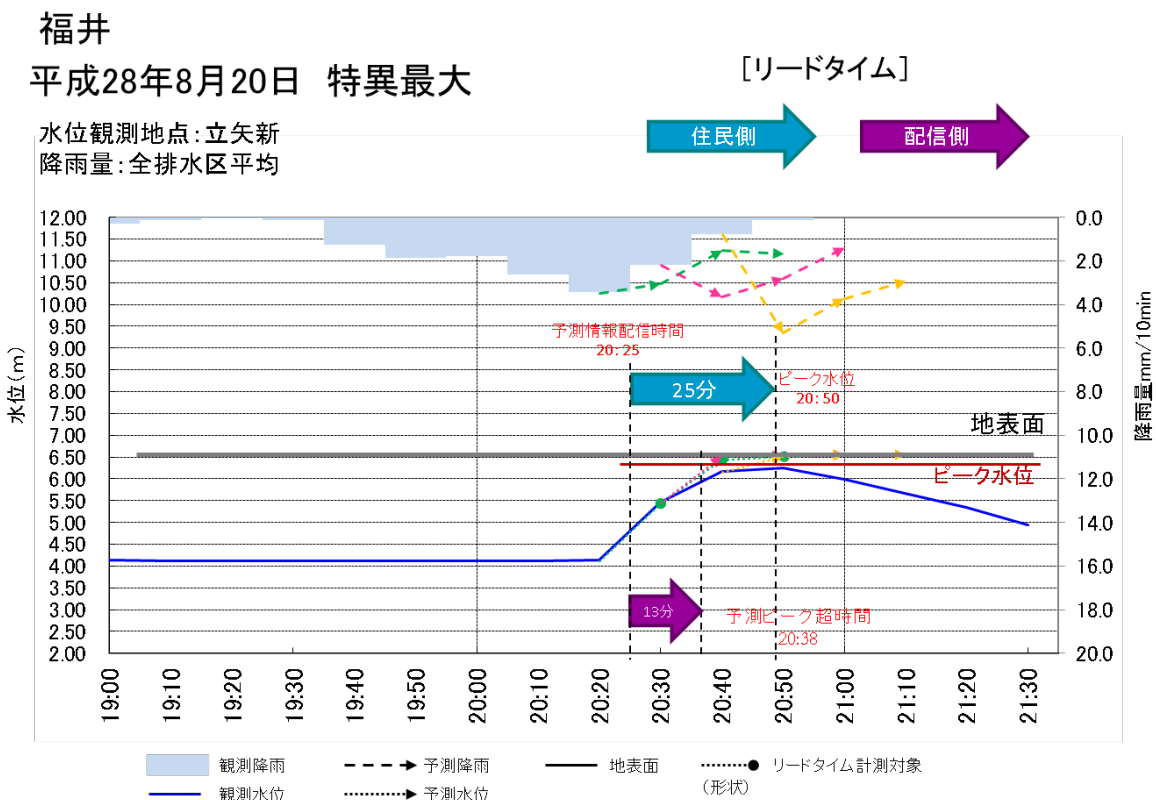
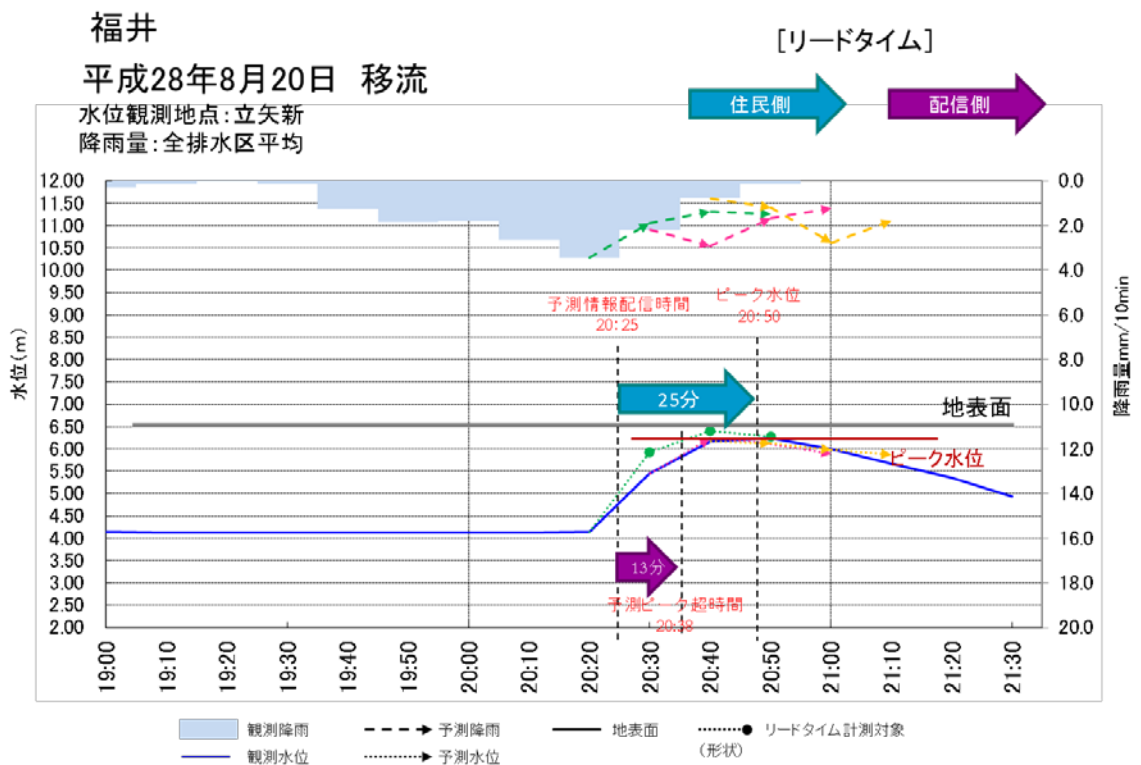


図 3-92 評価事例 (福井市 平成 28 年 8 月 20 日)

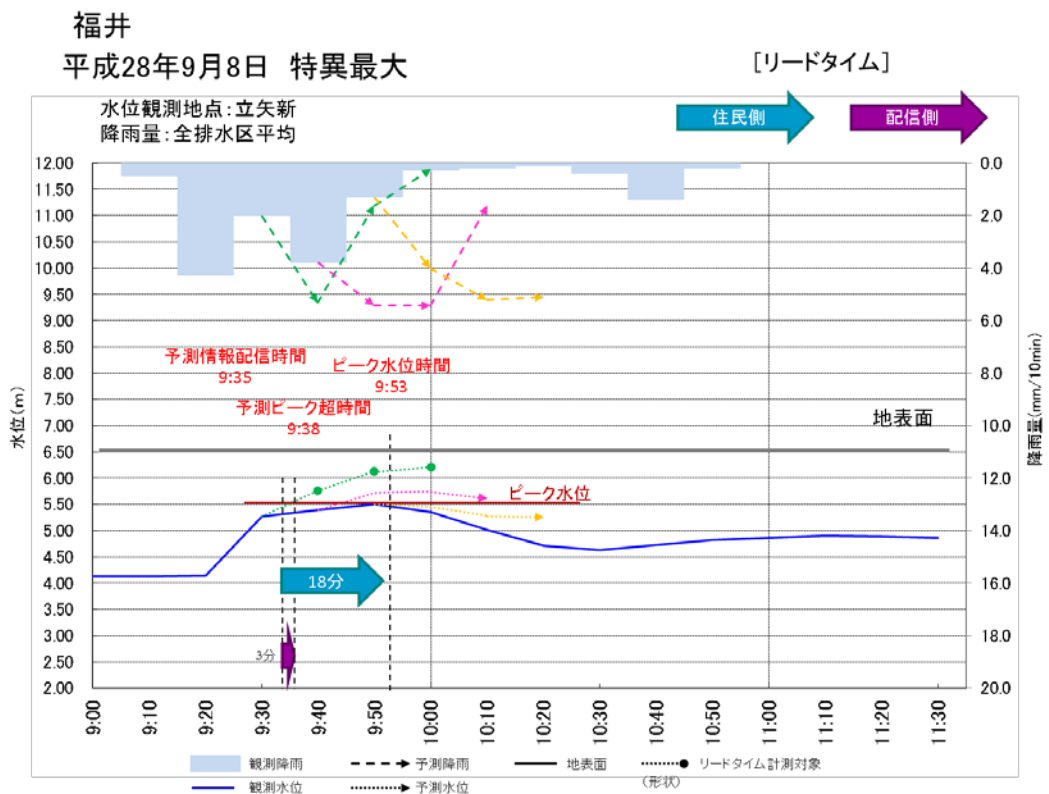
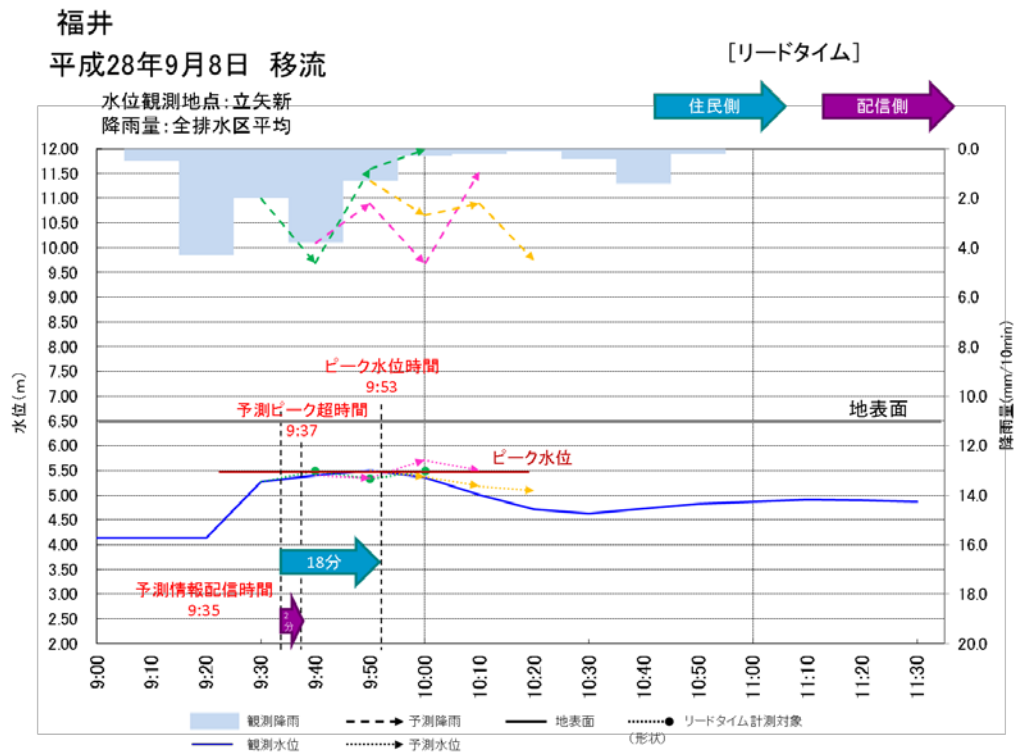
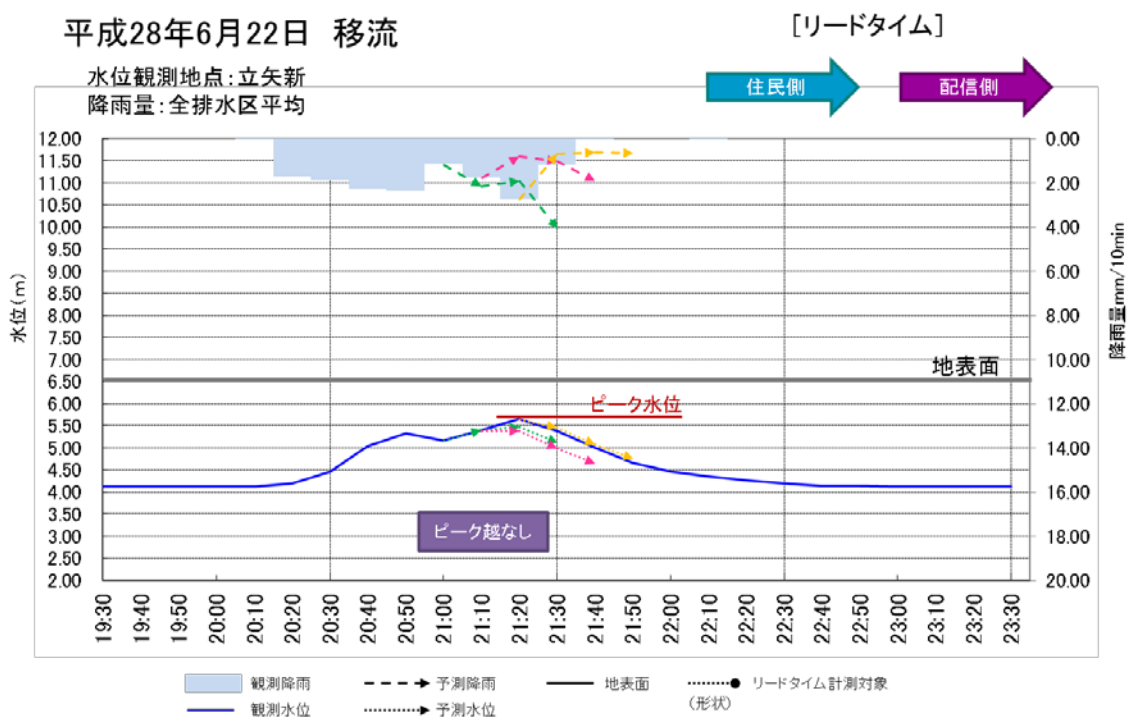


図 3-93 評価事例 (福井市 平成 28 年 9 月 8 日)

福井

平成28年6月22日 移流



福井

平成28年6月22日 特異最大

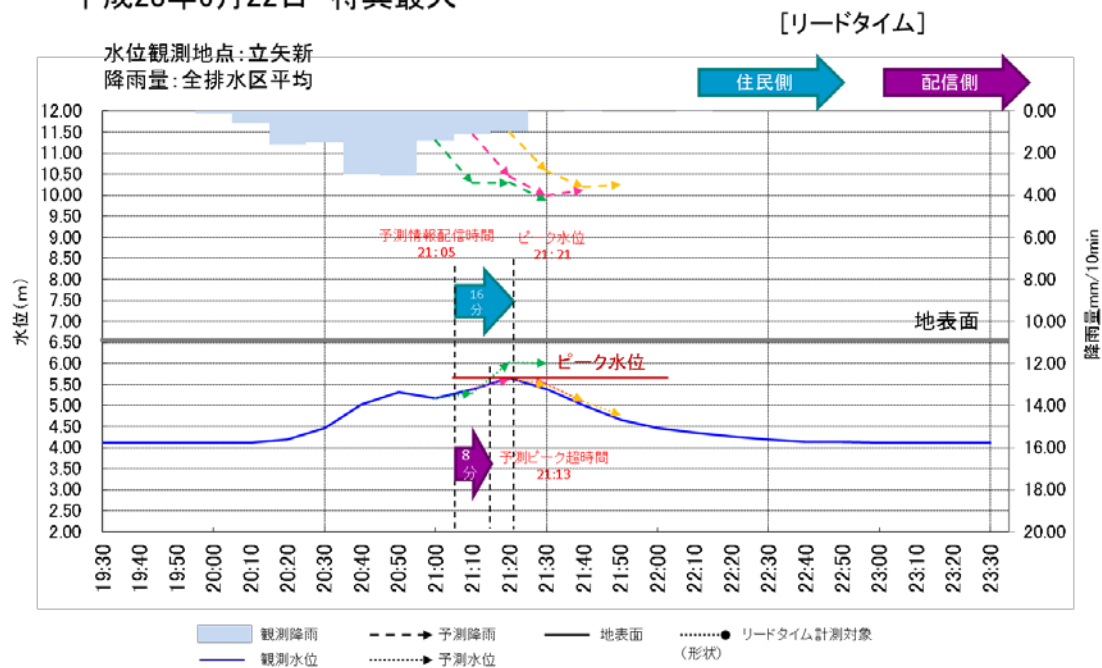


図 3-94 評価事例 (福井市 平成 28 年 6 月 22 日)

2) 富山市の評価事例

富山市の自助・共助支援におけるリードタイム評価結果を以下に示す。移流と特異最大の水位予測値に基づきリードタイムを算出した結果、リードタイムを確保出来たケースが移流（0 ケース）、特異最大（3 ケース）であり、特異最大がリードタイムを確保できるケースが多かった。

表 3-23 リードタイム評価結果（移流）

降雨イベント		①	②	③	④	⑤
		7/26	9/18	7/13	7/13	8/9
住民側から見た リードタイム	時間	0 分	15 分	4 分	2 分	18 分
配信側から見た リードタイム	時間	0 分	7 分	3 分	2 分	7 分

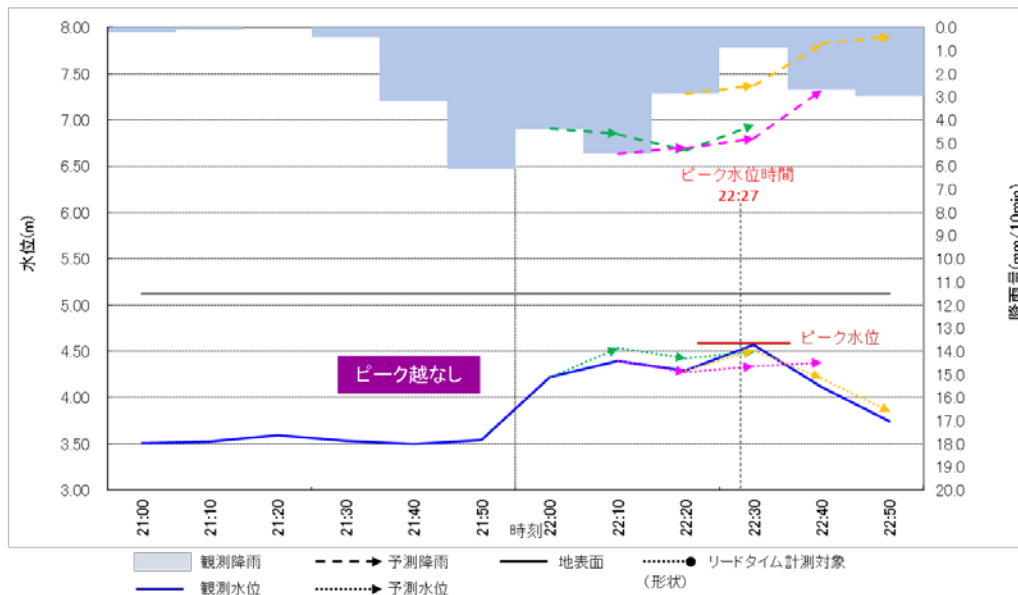
表 3-24 リードタイム評価結果（特異最大）

降雨イベント		①	②	③	④	⑤
		7/26	9/18	7/13	7/13	8/9
住民側から見た リードタイム	時間	22 分	25 分	14 分	22 分	18 分
配信側から見た リードタイム	時間	14 分	17 分	13 分	13 分	7 分

次頁以降に富山市の評価事例を示す。

富山
平成28年7月26日 移流

水位観測地点:新富田町
降雨量:呉羽排水区平均



富山
平成28年7月26日 特異最大

水位観測地点:新富田町
降雨量:呉羽排水区平均

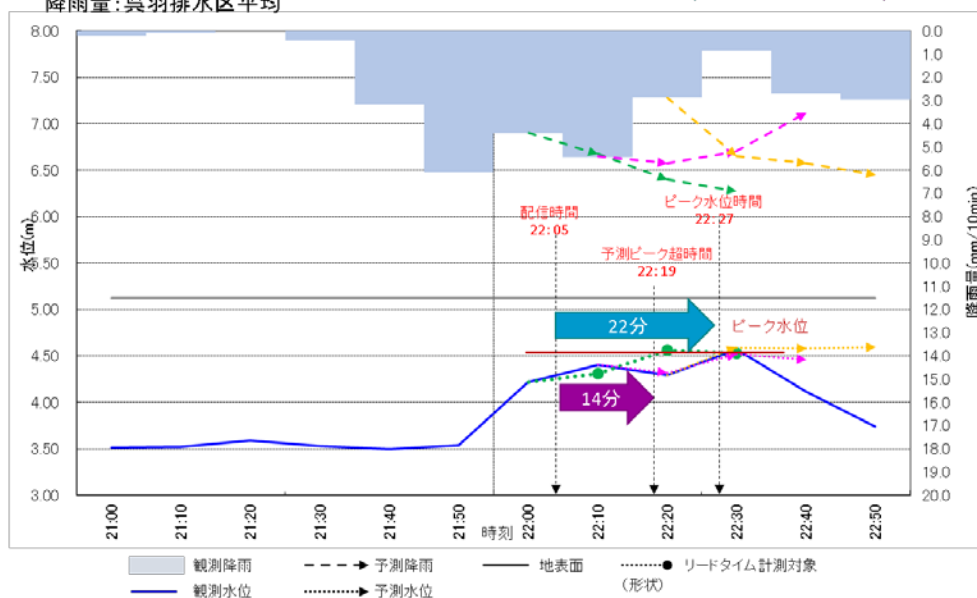


図 3-95 評価事例 (富山市 平成 28 年 7 月 26 日)

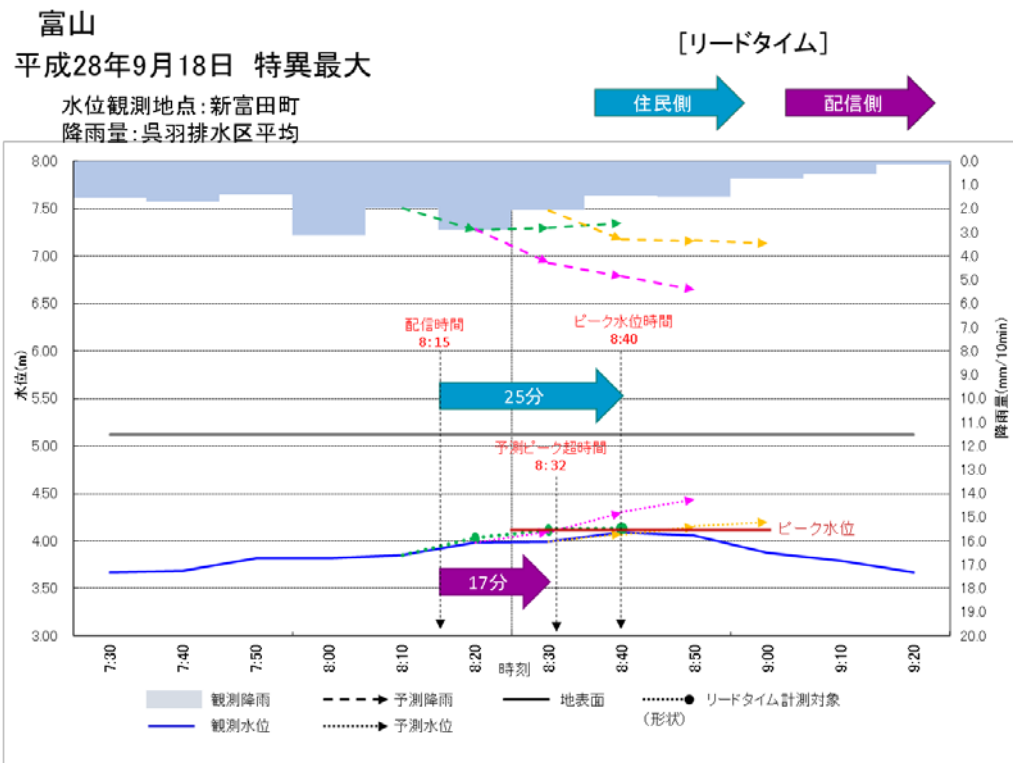
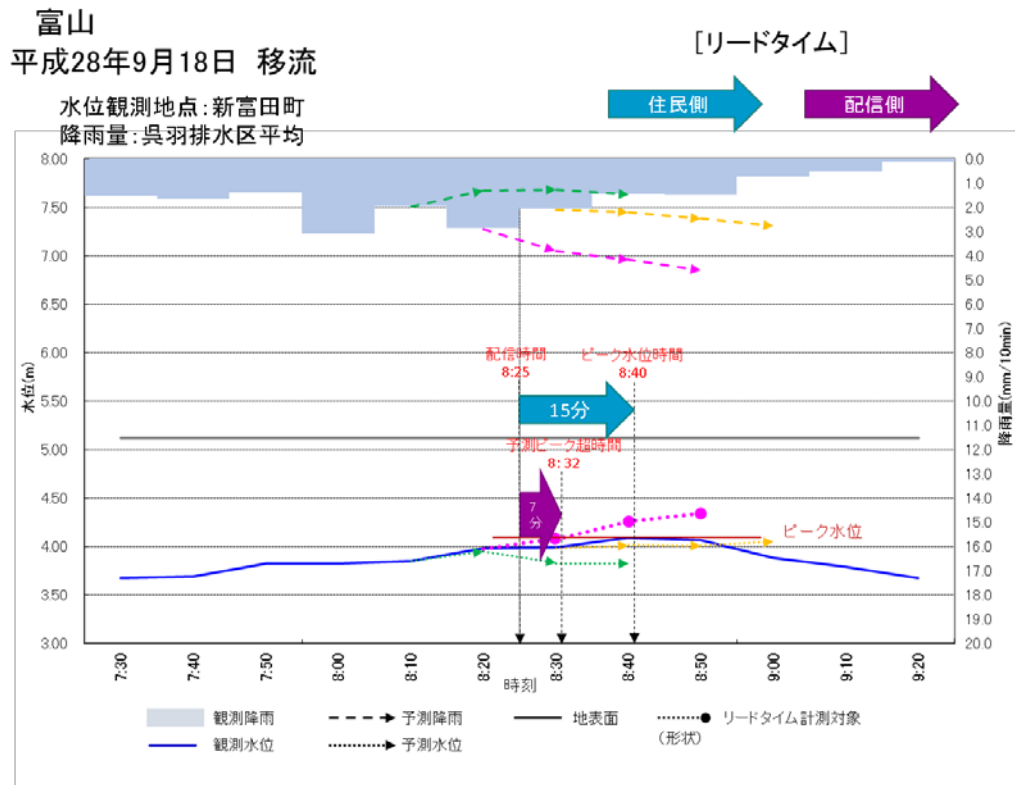
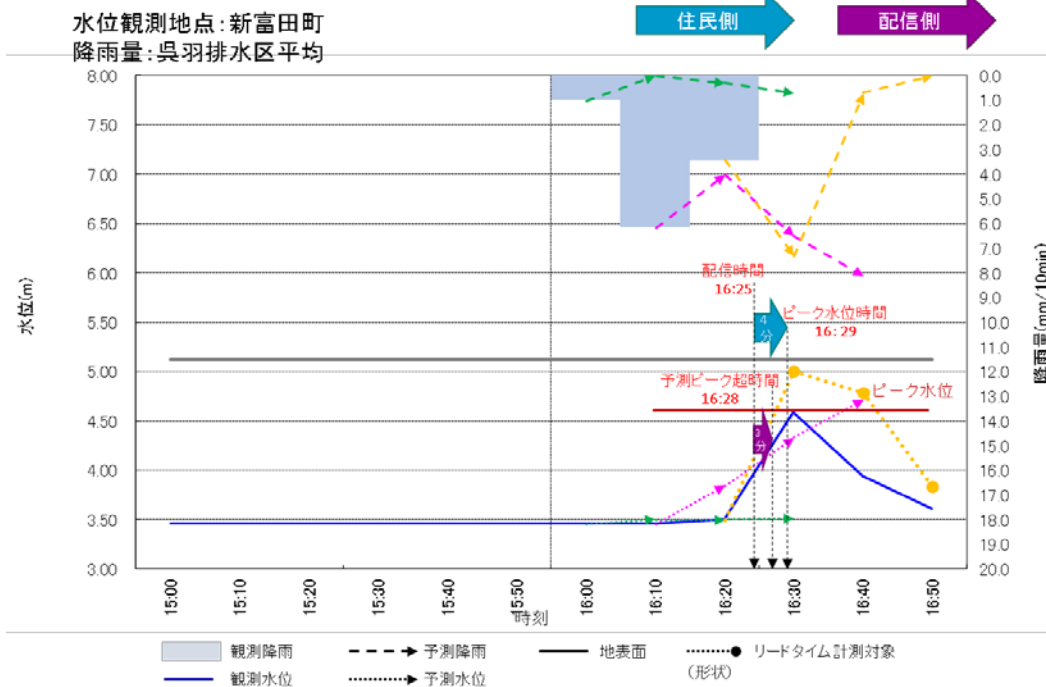


図 3-96 評価事例 (富山市 平成 28 年 9 月 18 日)

富山
平成28年7月13日 移流



富山
平成28年7月13日 特異最大

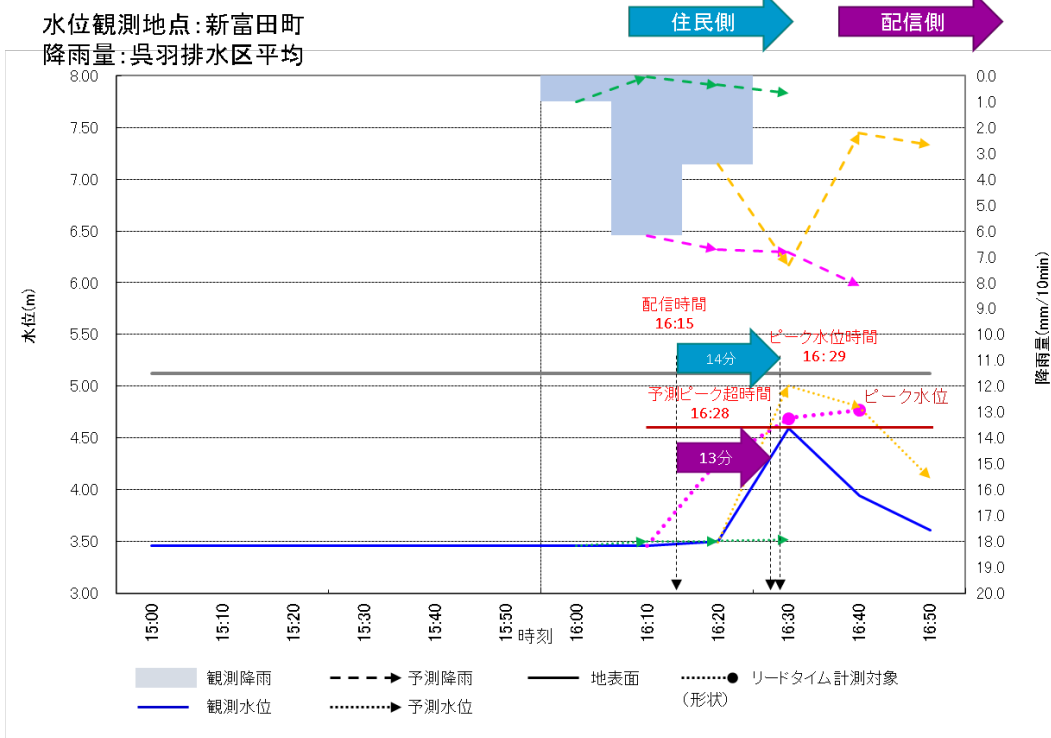


図 3-97 評価事例 (富山市 平成 28 年 7 月 13 日①)

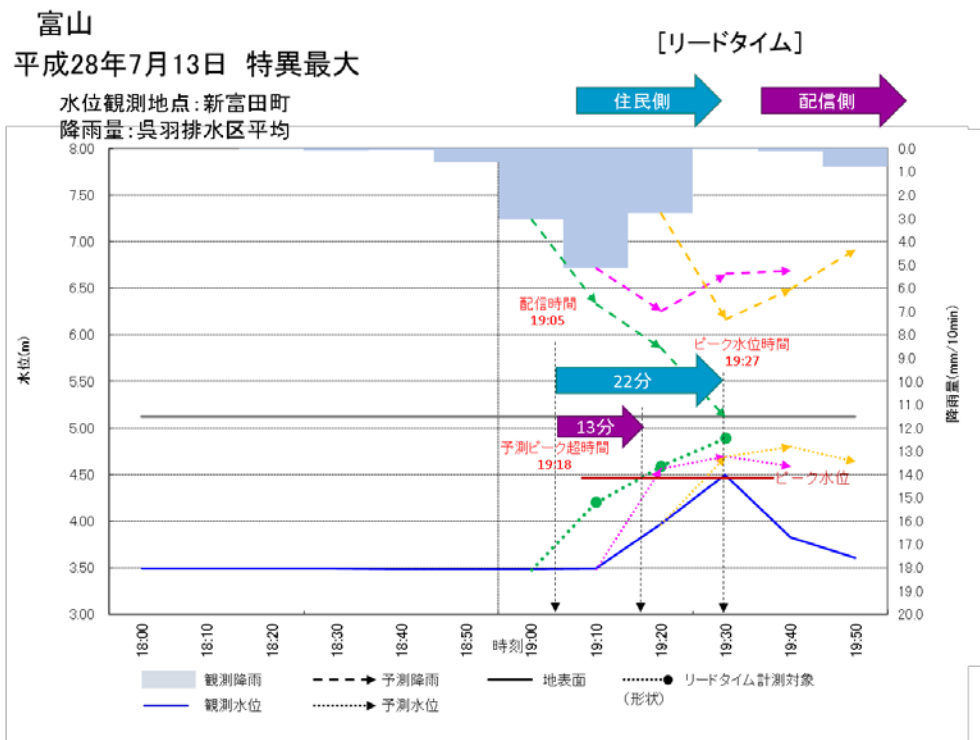
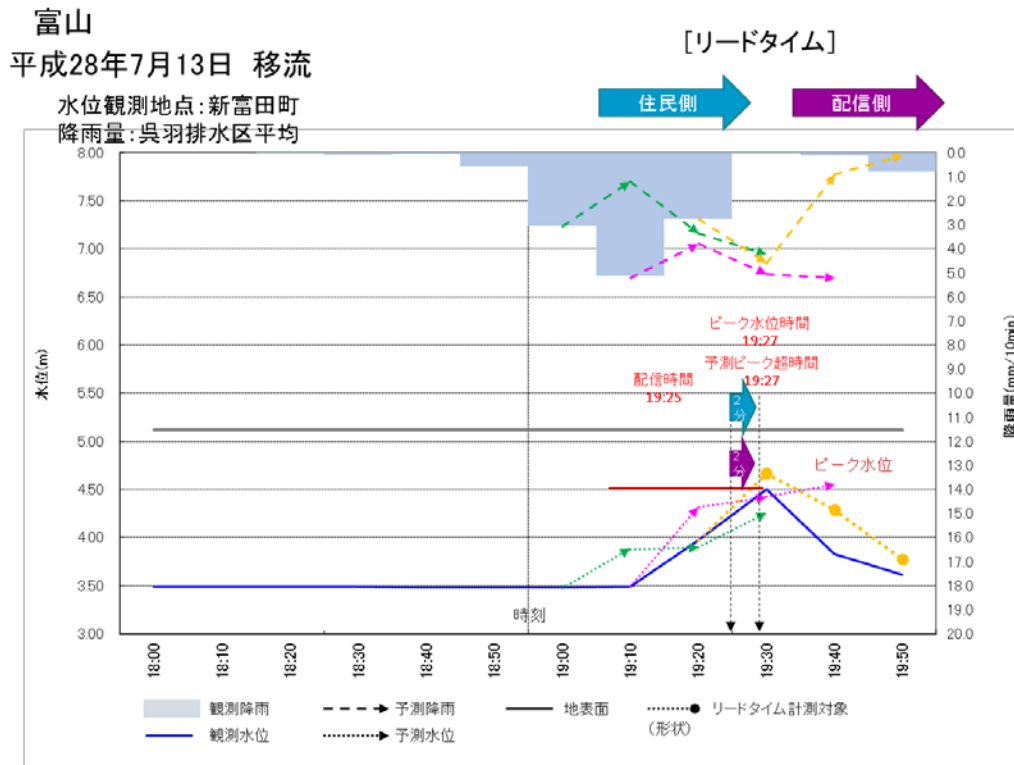


図 3-98 評価事例(富山市 平成28年7月13日②)

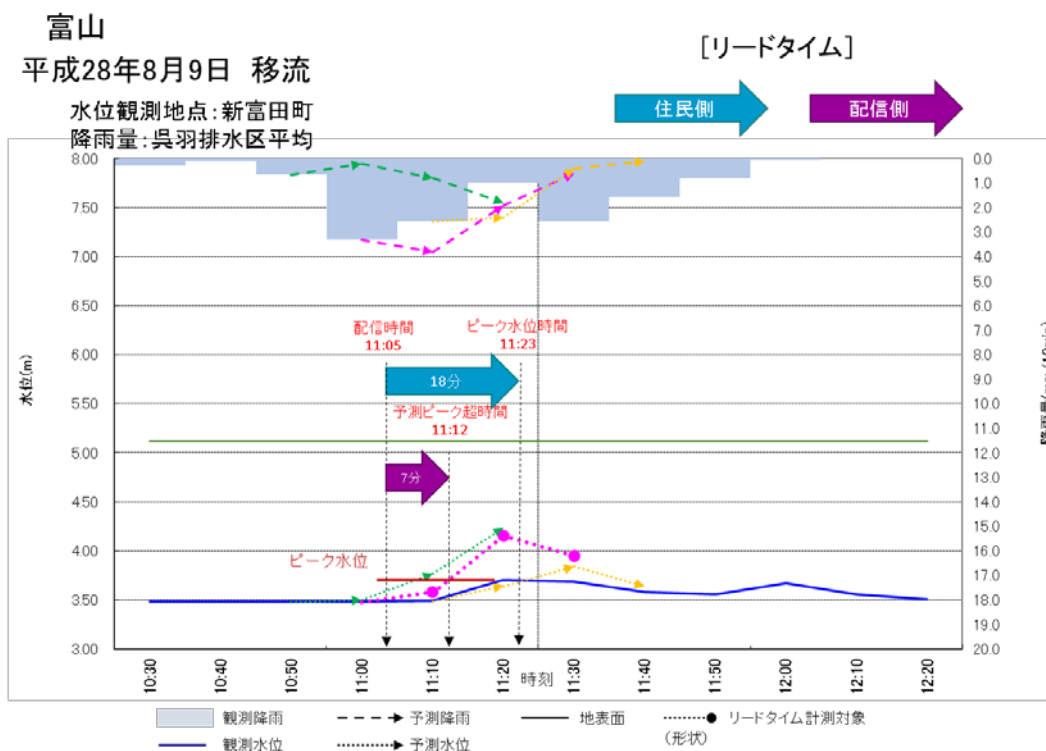
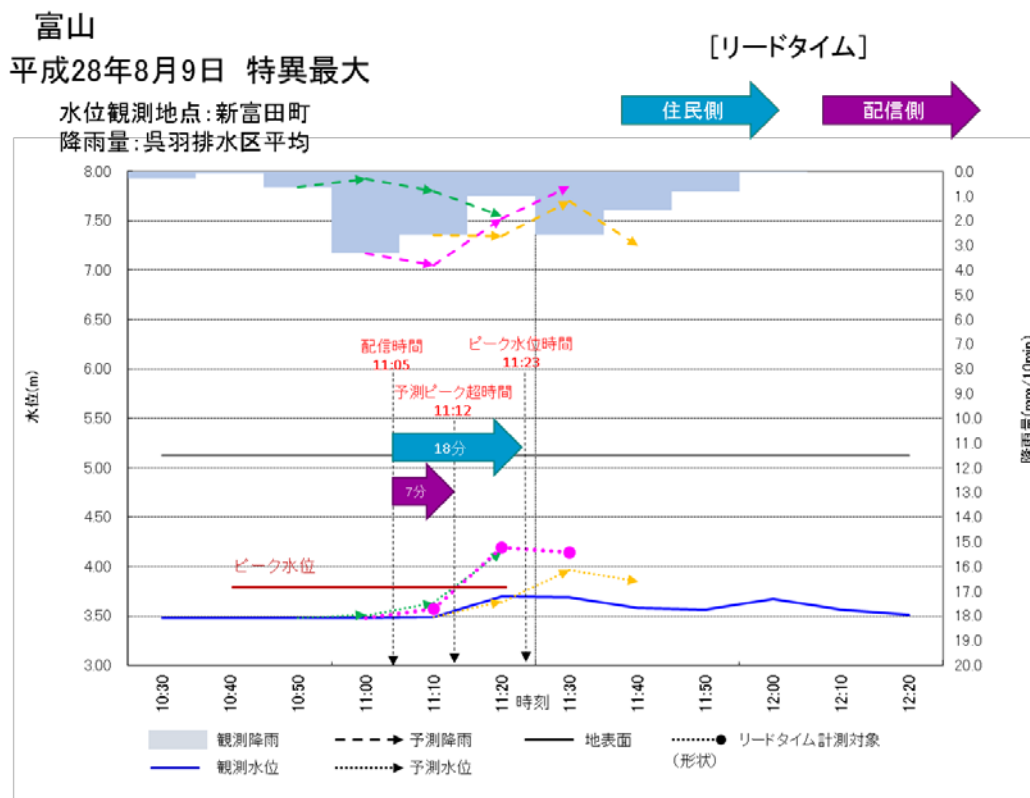


図 3-99 評価事例 (富山市 平成28年8月9日)

3) リードタイム確保に向けた対策

本研究においては、リードタイム 20 分以上を確保できないケースがあったため、以下の対応を検討する。なお、リードタイム確保のために安全側の対応を採用する場合、一方で空振りが増える点に注意が必要である。

- ・住民との対話の中で、降雨の状況によってリードタイムが確保できないケースがあることを説明し、早めの行動を促す。
- ・「過去の降雨を用いて浸水発生から床下浸水に至るまでの時間」を確認し、その結果を踏まえ、浸水発生を判断する水位基準を引き下げる（例：地上面－〇m）