



# 40) WGAN-GPを用いたMSM降水量の統計的ダウンスケーリングと洪水予測精度の評価

Statistical downscaling of MSM precipitation using WGAN-GP and evaluation of flood forecast accuracy

富樫圭亮<sup>1</sup>・新井章珣<sup>1</sup>・吉田天<sup>1</sup>・鈴木皓達<sup>1</sup>・飯野広大<sup>1</sup>・遠藤咲季<sup>1</sup>・稲津将<sup>2</sup>

1. 三井共同建設コンサルタント株式会社

2. 北海道大学 大学院理学研究院

## 1. 背景・目的

地球温暖化で水害の頻発化・激甚化

→流域治水が重要！！

降雨予測に基づく洪水予測の高度化

- ✓ MEPSを用いたアンサンブル予測
- ✓ Shiraishi et.al(2025): Wasserstein GAN with Gradient Penalty(WGAN-GP)を用いた、高解像度降雨場の生成。

降雨場の再現性評価に焦点を当てた研究は多いが、洪水予測等の水文応答への効果を、運用上の観点から検証していない。

### 本研究の目的

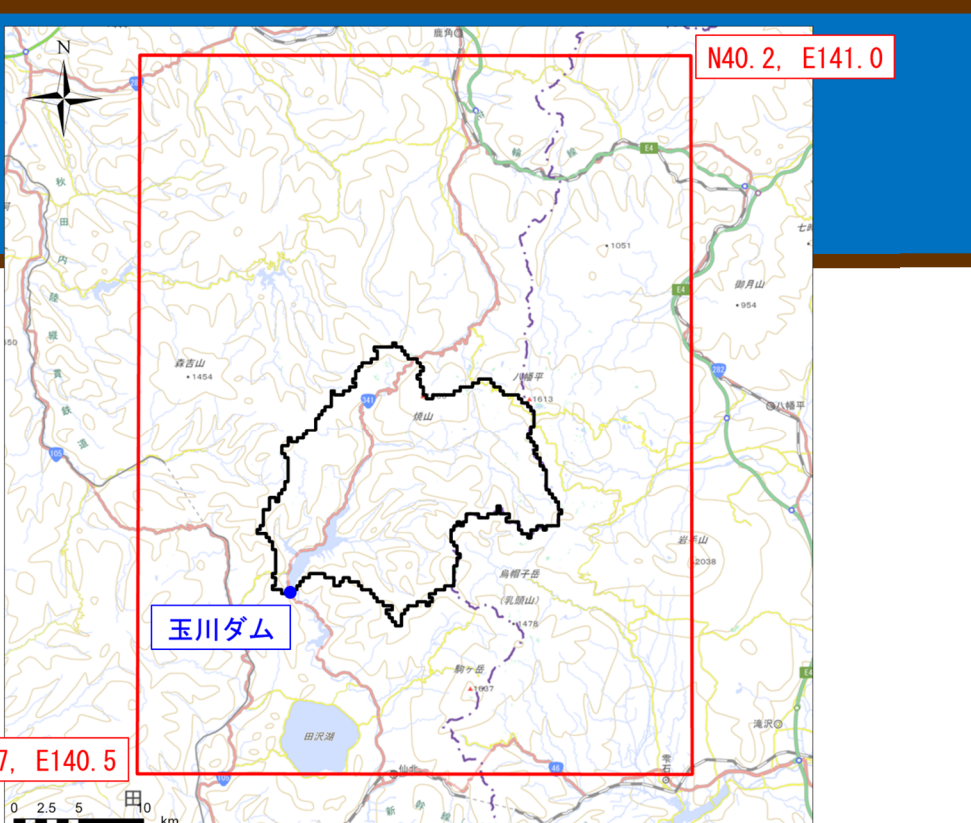
統計的ダウンスケーリングによりMSM予測雨量の高精度化・高解像度化を実現し、洪水予測精度向上を図る。

※本研究で扱う“統計的ダウンスケーリング”は、空間解像度の高度化だけではなく、MSM予測雨量に含まれる系統的な予測誤差の補正も含む。

WGAN-GPを用いてMSM予測雨量を解析雨量相当の空間解像度へダウンスケーリングする機械学習モデルを構築した。また、生成した降水データを降雨流出氾濫(RRI)モデルへ入力し、ダム流入量予測への効果を検証した。

## 2. 対象流域

- 玉川ダム流域(雄物川水系)
- 流域面積: 287 km<sup>2</sup>
- 総貯水容量: 2億5,400万 m<sup>3</sup>
- 計画高水流量: 2,800 m<sup>3</sup>/s



## 3. 使用データ

流量データ

- 融雪による影響が無い洪水
- 実績ピーク流入量が400 m<sup>3</sup>/s以上

| No | 洪水日       | 学習期間      | ピーク流入量 (m <sup>3</sup> /s) | 区分       |
|----|-----------|-----------|----------------------------|----------|
| 1  | 2017/7/23 | 7/15~7/24 | 1,030                      | 学習<br>洪水 |
| 2  | 2017/8/25 | 8/21~8/31 | 1,196                      |          |
| 3  | 2018/5/16 | 5/16~5/19 | 635                        |          |
| 4  | 2020/7/12 | 7/1~7/31  | 378                        |          |
| 5  | 2022/8/3  | -         | 1,116                      |          |
| 6  | 2022/8/12 | 8/1~8/21  | 561                        |          |
| 7  | 2023/7/15 | 7/1~7/21  | 741                        |          |
| 8  | 2024/7/1  | -         | 455                        |          |
| 9  | 2024/7/24 | 6/28~7/31 | 407                        |          |
| 10 | 2024/7/26 | -         | 456                        |          |
| 11 | 2025/8/20 | -         | 1,064                      | 検証<br>洪水 |
| 12 | 2025/9/2  | -         | 770                        |          |

雨量データ

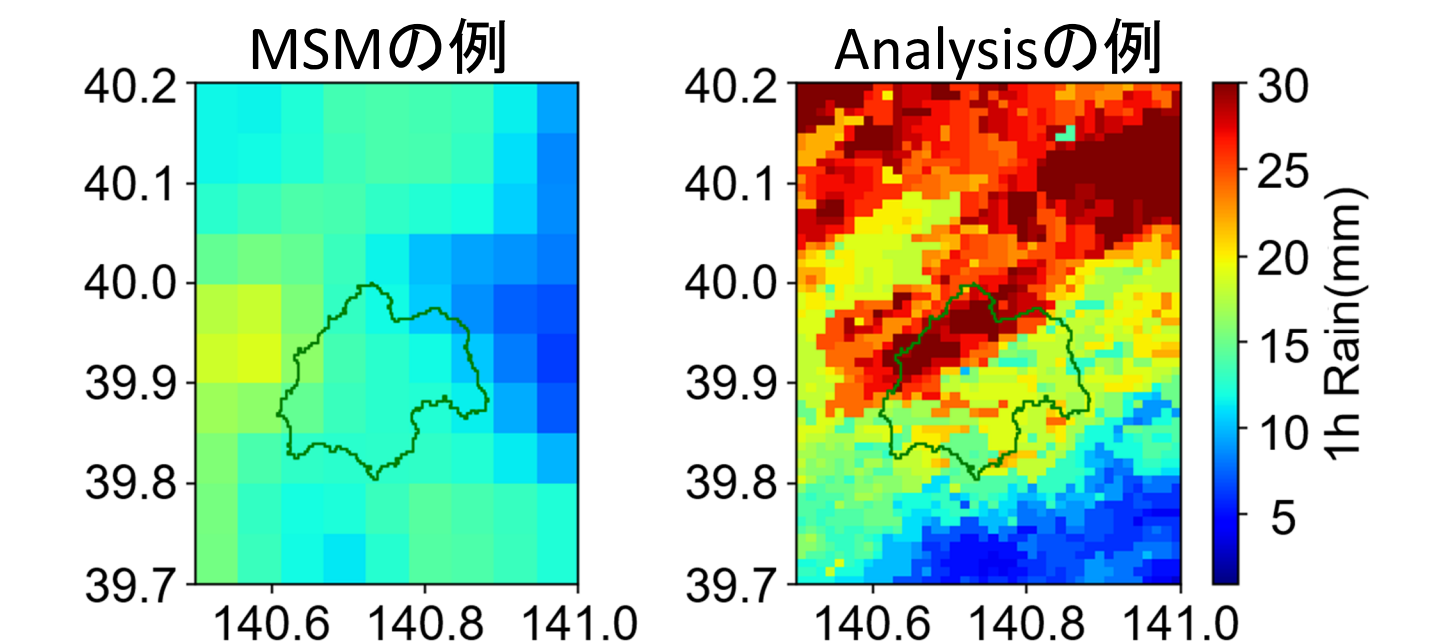
1 mm/hr以上のデータのみ使用  
(弱雨時のサンプルが支配的になることを避けるため)

○メソ数値予報モデル(MSM)

- ・空間解像度: 約5 km
- ・時間間隔: 1時間
- ・気象要素: 降水, 湿度, 風(東西風・南北風)

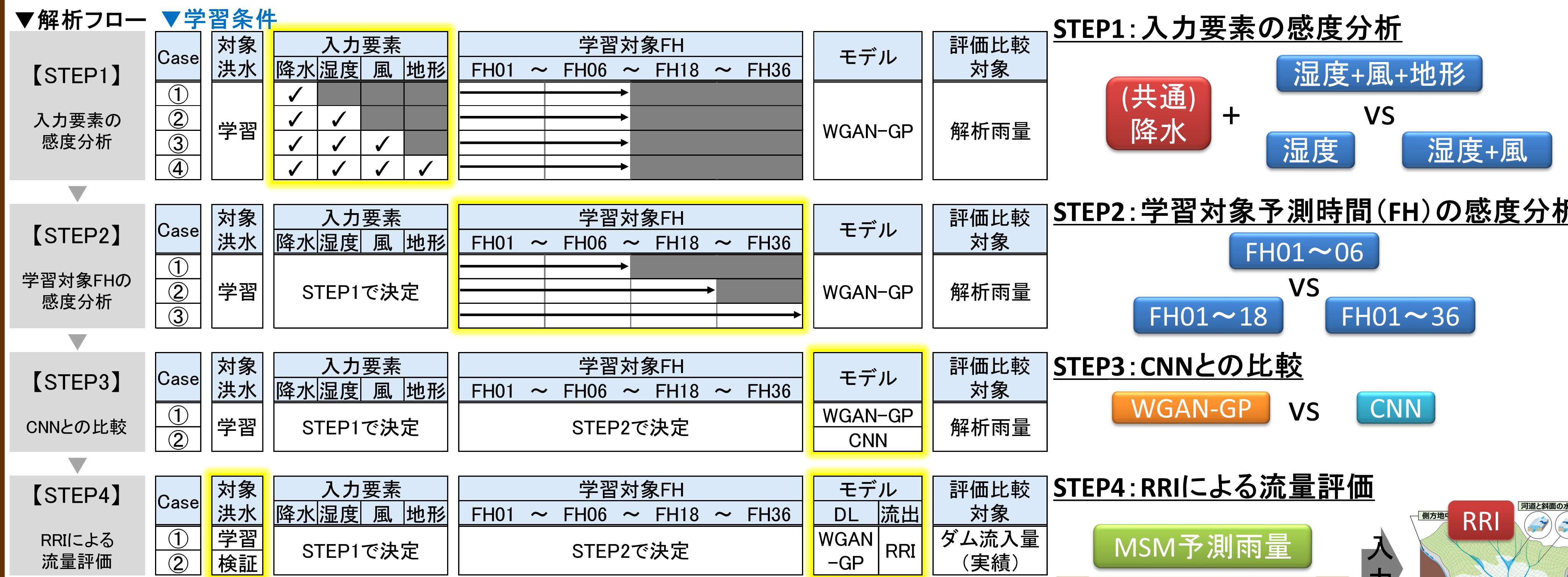
○正規版解析雨量(Analysis)

- ・空間解像度: 約1 km
- ・時間間隔: 30分



地形データ  
○日本域表面流向マップ(5秒メッシュ)

## 4. 解析フロー



※本研究の統計的ダウンスケーリングの定義: 単純な空間補間により解像度を細分化するものではなく、MSM予測場と同時刻の解析雨量場の対応関係を学習し、降雨強度の偏り補正に加えて、降雨域の位置ずれを含む予報誤差の統計的補正を同時に行う。

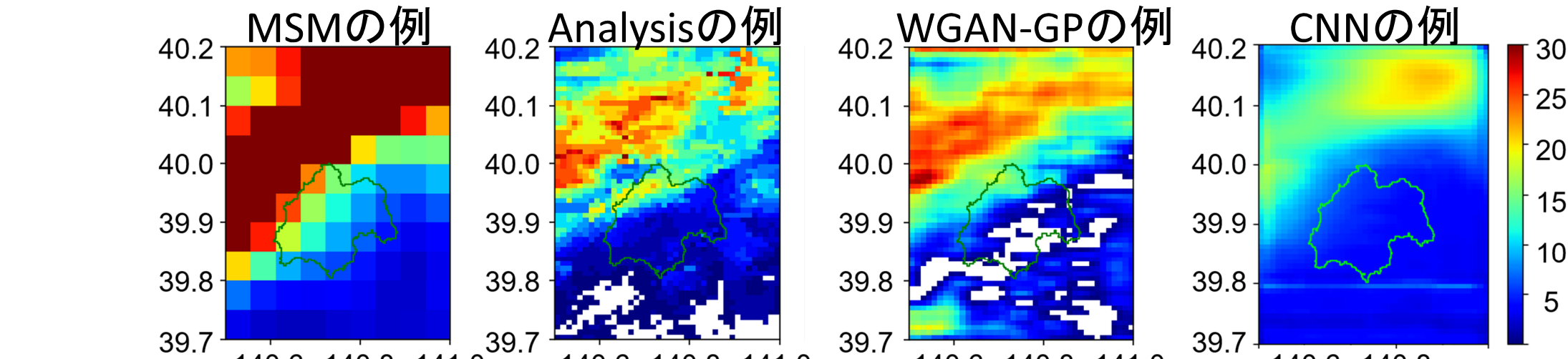
(1)生成モデル

i. WGAN-GP

- 生成器G: MSM格子上的入力気象場から解Analysis格子上的降雨場の生成
- 識別器D: Analysis(正解)と生成雨量に対してスカラー値を出力するCritic
- Wasserstein距離に基づく損失関数 & Gradient Penaltyを導入⇒学習の安定化

ii. CNN

- 入力および出力設定は WGAN-GP と同一
- 本研究ではDeep Learning(DL)を用いた画像解析の代表例として利用

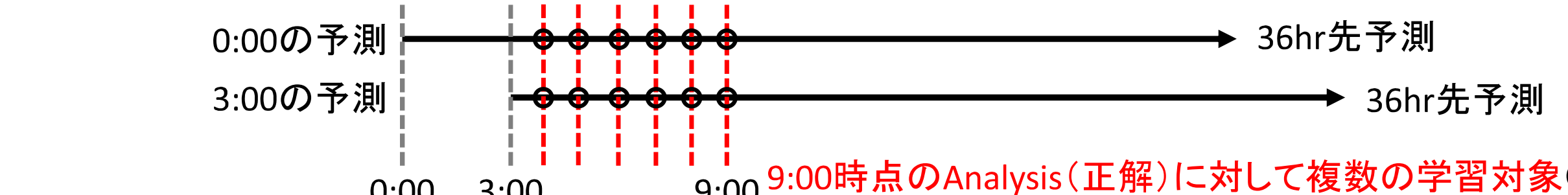


(2)入力データと学習条件

入力データは以下の通り設定し、再現性を評価。

|   | 学習に用いる要素             | 学習に用いる予測時間 |
|---|----------------------|------------|
| ① | 降水のみ                 | FH01~FH06  |
| ② | 降水+湿度                | FH01~FH18  |
| ③ | 降水+湿度+風(東西風・南北風)     | FH01~FH36  |
| ④ | 降水+湿度+風(東西風・南北風)+DEM |            |

※FH毎に別個のモデルは構築せず、単一のモデルに各FHのMSMデータを入力。



- 例えば、12:00時点の Analysis に対して、MSM 予測雨量は0:00時点のFH12と3:00時点のFH09等に対応する。(他にも多数)
- 学習する予測時間が長くなるほど正解に対する学習データが増加する。

(3)RRIモデルによるダム流入量の推定

- Analysisを入力として、RRIモデルパラメータを同定
- SCE-UA法による最適化
- 未学習洪水を再現可能なモデルパラメータ

| 河道モデル | 河道係数 | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) |
|-------|------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 河道モデル | 河道係数 | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) |
| 河道モデル | 河道係数 | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) |
| 河道モデル | 河道係数 | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) |
| 河道モデル | 河道係数 | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) |
| 河道モデル | 河道係数 | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) |
| 河道モデル | 河道係数 | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) |
| 河道モデル | 河道係数 | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) |
| 河道モデル | 河道係数 | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) |
| 河道モデル | 河道係数 | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) |
| 河道モデル | 河道係数 | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) | (a <sup>2</sup> ・s <sup>2</sup> ・m/s) |

雨量データ

解析雨量 WGAN-GP生成雨量  
現時刻 MSM予測雨量 +36hr

地形データ

側方地中流 内水氾濫 外水氾濫 船直浸透流

出力

- ✓ 流域平均ハイト
- ✓ Analysis
- ✓ MSM
- ✓ WGAN-GP
- ✓ 玉川ダム流入量
- ✓ Analysisによる計算結果
- ✓ MSMによる計算結果
- ✓ WGAN-GPによる計算結果

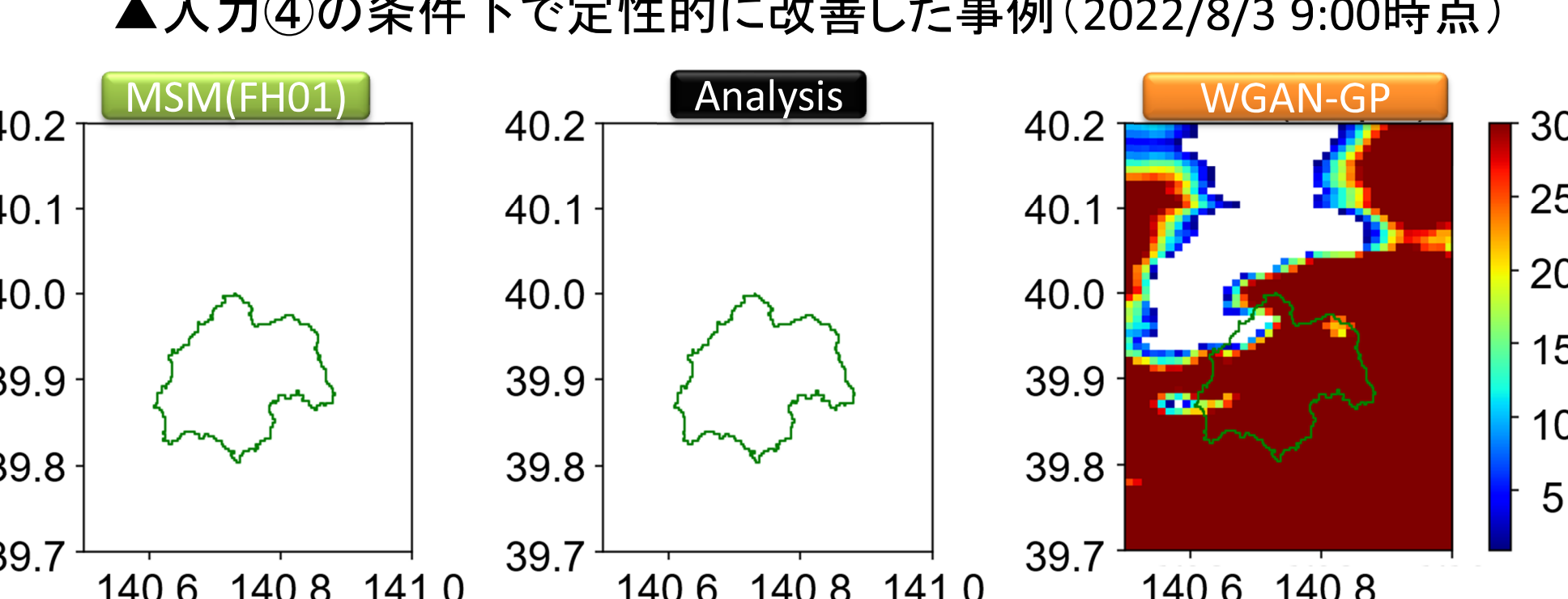
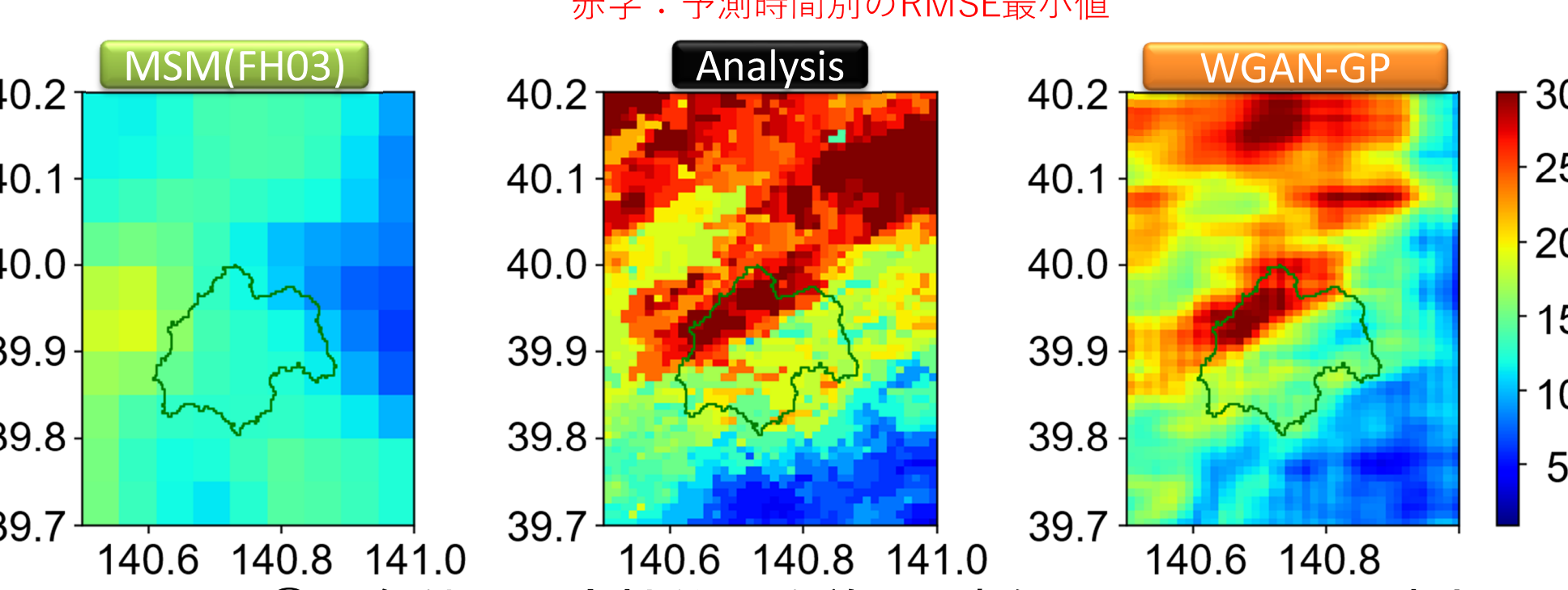
## 6. 結果

(1)入力要素・学習対象予測時間の検討

▼入力要素別のRMSE (WGAN-GP)

| 予測時間 (hr) | 入力 ① | 入力 ② | 入力 ③ | 入力 ④ | MSM 元データ |
|-----------|------|------|------|------|----------|
| 1         | 3.45 | 3.65 | 3.44 | 3.51 | 3.89     |
| 3         | 4.43 | 4.21 | 3.76 | 4.01 | 4.48     |
| 6         | 5.25 | 5.00 | 4.86 | 5.10 | 5.27     |
| 12        | 5.60 | 5.46 | 5.47 | 5.51 | 5.96     |
| 18        | 5.24 | 5.37 | 5.21 | 5.08 | 5.32     |
| 24        | 5.57 | 5.47 | 5.46 | 5.33 | 5.57     |
| 30        | 5.30 | 5.39 | 5.33 | 5.31 | 5.39     |
| 36        | 5.82 | 5.76 | 5.67 | 5.53 | 5.71     |

- 学習対象予測時刻は FH01~06
- ⇒FH07~36 は検証結果
- 長時間予測では入力④が高精度

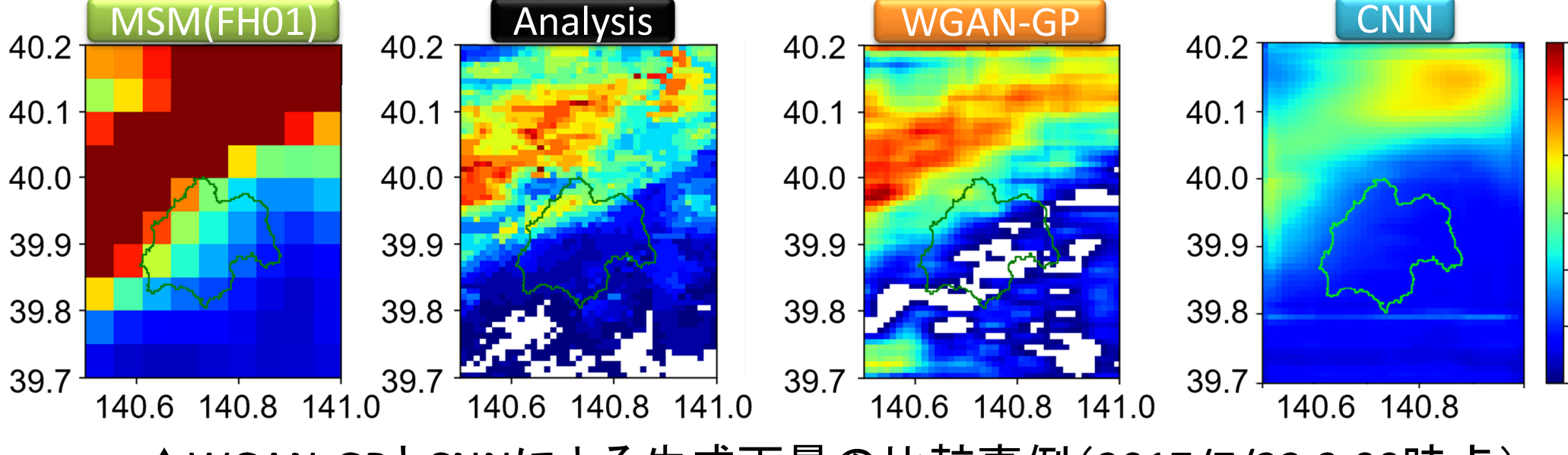


▲入力④の条件下で定性的に改善した事例(2022/8/3 9:00時点)

▲FH01~36を学習し過学習となった事例(2017/7/15 10:00時点)

✓ 入力④, FH01~06の学習モデルが最も高精度

(2)WGAN-GPとCNNの比較



▲WGAN-GPとCNNによる生成雨量の比較事例(2017/7/22 9:00時点)

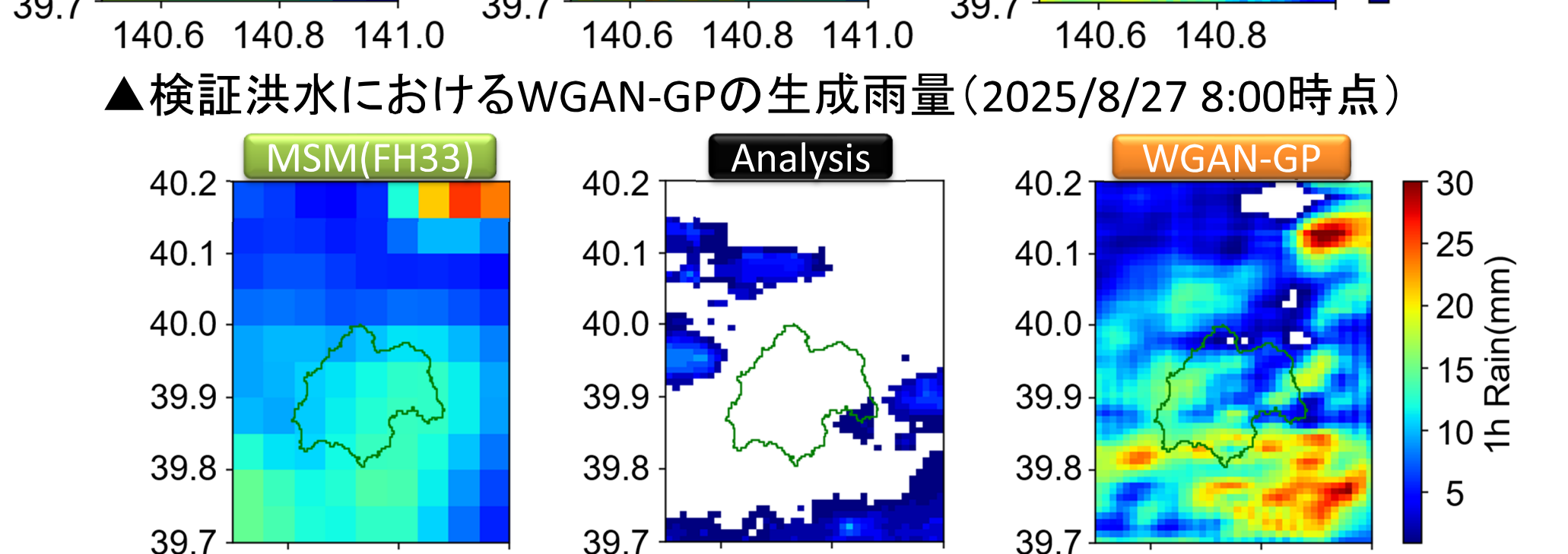
▲解析雨量とWGAN-GP, CNNの流域平均ハイト-グラフ(2017/7/22 9:00時点)

✓ CNN ⇒ ○大局的な分布を概ね再現

✓ WGAN-GP ⇒ ○強雨域の集中度及び発生位置が解析雨量に近く、強雨域の過度な平滑化が抑制

×強雨域のピークが平滑化され、局地的な集中が弱まる

(3)検証洪水における降雨場の再現性



▲検証洪水におけるWGAN-GPの生成雨量(2025/8/27 8:00時点)

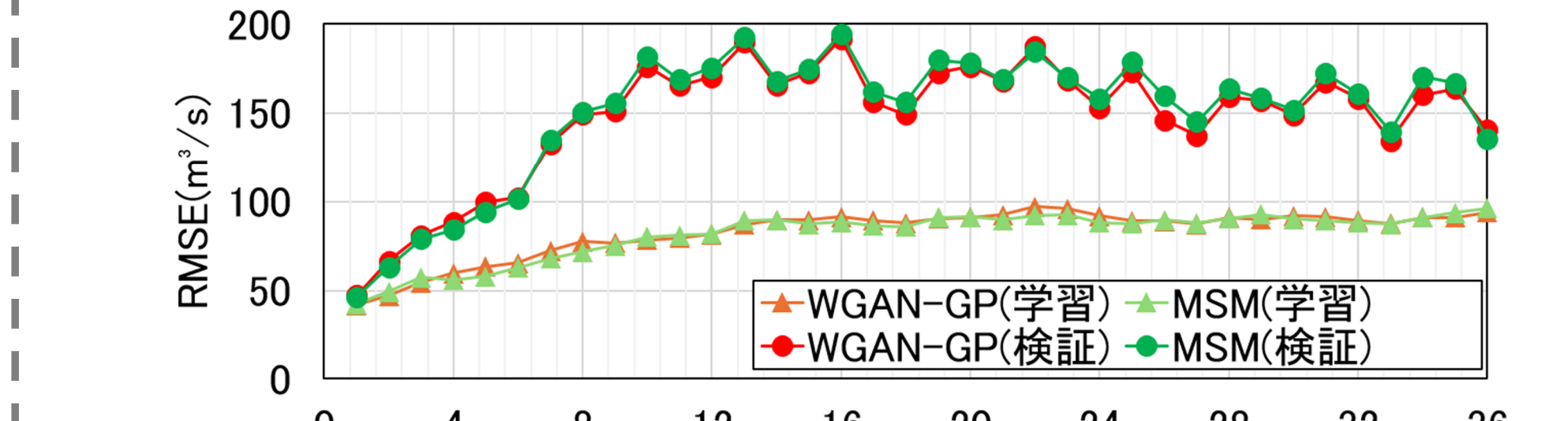
▲MSMとWGAN-GPが空振り傾向にある例(2025/9/3 9:00時点)

✓ 検証洪水でも MSM 予測雨量に WGAN-GP モデルを適用することにより、改善が定性的に認められた。

✓ MSM が空振り or 見逃し傾向 ⇒ WGAN-GP 生成雨量も同じ傾向を示す。

▲MSMとWGAN-GPが見逃し傾向にある例(2025/9/2 9:00時点)

(4)ダム流入量予測への効果(RRIモデル)



▲ダム流入量の予測時間毎のRMSE

▲学習洪水の改善例(2022/8/2 9:00時点の予測結果)

▲検証洪水の改善例(2025/8/19 9:00時点の予測結果)

✓ RMSEの改善 × ⇒ MSMと同じ傾向を示すため。

✓ ダム流入量の再現性向上に一定以上寄与

## 考察

- ✓ 入力①より④の方が長時間予測で高精度なのは、DEMは地形性降雨の空間的な偏りに関する静的情報を与えるため、強雨域の発生位置や集中度の推定を安定化させた可能性がある。
- ✓ FH36までを学習させて精度が下がったのは、長時間先ほど弱雨サンプルが増加し、弱雨サンプル×正解の強雨事例の組合せが増加し、生成が不安定化された可能性が示唆された。
- ✓ MSMが解析雨量に対して空振りを示すケースでは、生成モデルが入力に含まれる強い降雨シグナルを打ち消すことができず、空振りの残存が生じた。見逃しは強雨域の再現が困難。
- ✓ RRIモデルによる流入量推定では、WGAN-GPにより強雨域の位置・集中度が一定程度補正され、結果として流域平均雨量のピークや時間推移の再現性が向上した可能性がある。