

2025年10月16日(木)

国立環境研究所主催
令和7年度気候変動適応セミナー

気候変動下における 新しい治水のあり方

土木学会 豪雨災害対策総合検討会

土木学会 台風第19号災害総合調査団

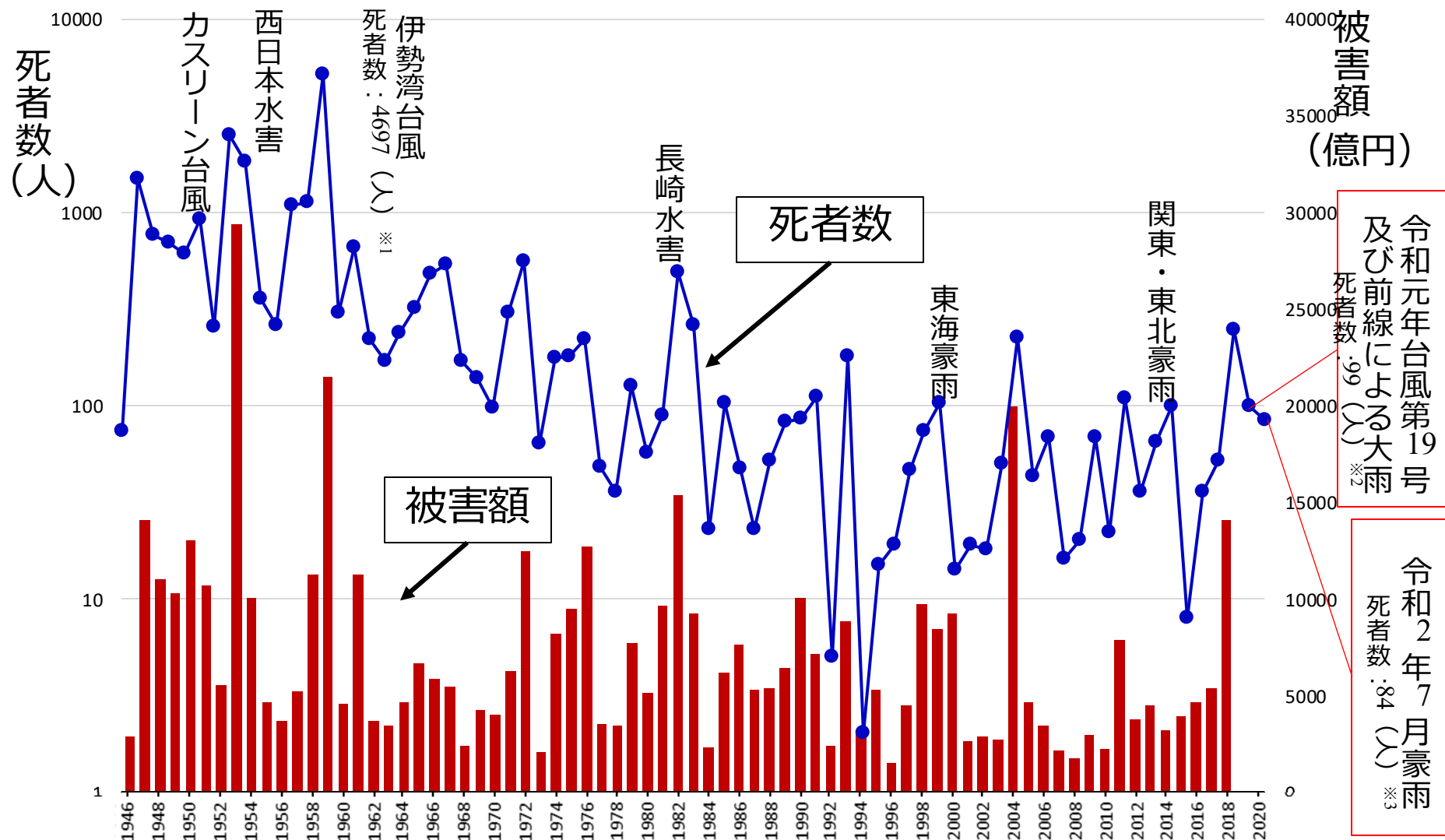
2015年関東・東北豪雨災害 土木学会・地盤工学会 合同調査団長

中央大学名誉教授

中央大学研究開発機構教授

教授 山田 正

水害による死者数と水害被害額の関係



注) 死者数は、水害・土砂災害による合計値であり、各年の水害被害額は、2005年価格に実質化したものである。また、2019年度と2020年度の項目にはそれぞれ、「令和元年台風第19号及び前線による大雨」および「令和2年7月豪雨」に伴う死者数のみを記入した。

※1消防白書より

※2消防庁災害対策本部：令和元年台風第19号及び前線による大雨による被害及び消防機関等の対応状況（第63報）

※3内閣府 防災情報のページ：令和2年7月豪雨による被害状況等について（11月2日14:00現在）

※1946年から2018年までの水害による死者数および水害被害額は、国土交通省「水害統計調査」に掲載されているものを用いた。

近年における記録的豪雨

平成28年(2016) 台風による豪雨

4つの台風の上陸・接近による全道各地での記録的大雨が発生するとともに、前例のない広域な被害(氾濫、橋脚の流出、農業被害)が生じた。

251mm/3日(三股観測所)

死者:28名

※気象庁 台風第7号、第11号、第9号、第10号及び前線による大雨・暴風 平成28(2016)年8月16日～8月31日(速報)



空知川

【出典】国土交通省「平成28年台風第10号による出水状況について」

平成27年関東・東北豪雨(2015)

鬼怒川水系に線状降水帯による降水が集中し、鬼怒川が決壊した。

551mm/24時間(五十里観測所)

死者:8名

※気象庁災害時気象報告平成27年12月4日



鬼怒川

【出典】国土交通省 関東地方整備局

降雨量:270mm/2日(倉敷観測所)

死者:237名

※気象庁 平成30年7月豪雨(前線及び台風第7号による大雨等) 平成30年(2018年)6月28～7月8日
※内閣府 防災情報のページ令和元年版防災白書 特集第1章第1節1～1 平成30年7月豪雨(西日本豪雨)災害



高梁川

【出典】国土交通省 水害レポート2018

令和元年東日本台風(2019)

西日本から東日本の太平洋側を中心に激しい雨が降り、千曲川、阿武隈川の決壊が発生した。

196.8mm/2日(立ヶ花基準点)

死者:104名

※国土交通省 北陸地方整備局 信濃川河川事務所 令和元年東日本台風及び信濃川水系緊急治水対策プロジェクトの概要
※内閣府 令和元年台風第19号等に係る被害状況等について



千曲川

【出典】共同新聞「台風で19人死亡・16人が不明 千曲川決壊で大規模洪水」2019年10月13日 14時04分 <https://this.kiji.is/555867299551888481>

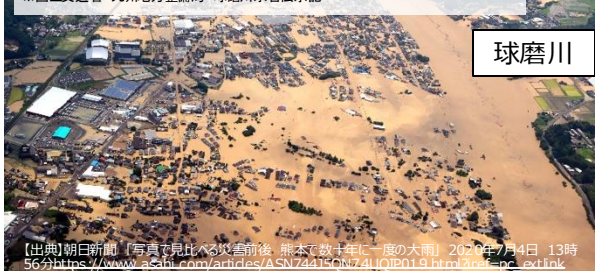
令和2年7月豪雨(2020)

梅雨前線が本州付近に停滞し、線状降水帯を伴う豪雨が広範囲に発生し、球磨川が決壊した。

322mm/12時間(人吉基準点)

死者:84名

※国土交通省 九州地方整備局 球磨川水害伝承記



球磨川

【出典】朝日新聞「写真で見比べる災害前後 熊本で数十年に一度の大雨」2020年7月31日 13時56分 https://www.asahi.com/articles/ASN244150637410019.html?ref=pc_extlink

平成30年7月西日本豪雨(2018)

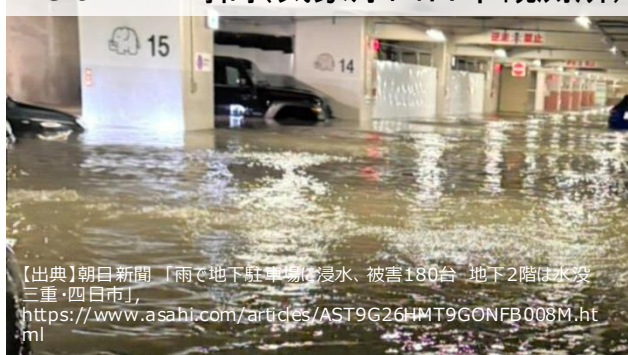
台風と梅雨前線の影響により、西日本を中心に多くの地域で河川の氾濫や土砂災害が発生した。

近年における内水氾濫

2025年9月12日の記録的大雨

同日22時頃からの大雨により市街地での道路冠水が広い範囲で発生。市内の地下駐車場は浸水し、274台の車が水没した

123.5mm/1時間(気象庁四日市観測所)



2025年8月10日~11日の大雨

熊本市中心部で内水氾濫が発生。下通アーケードを含む市街地で浸水が発生した。

233mm/3時間(気象庁熊本観測所)



令和5年7月14日からの梅雨前線による大雨

白神山地、太平山地を中心に総雨量が400mmを超える豪雨により、秋田市を中心に県内各所で浸水が発生

252.5mm/2日(気象庁秋田観測所)



2024年7月21日のゲリラ豪雨

約2時間のゲリラ豪雨により、東京メトロ南北線市ヶ谷駅に大量の雨水が流れ込み浸水

100mm/1時間(気象庁Cバンドレーダ)

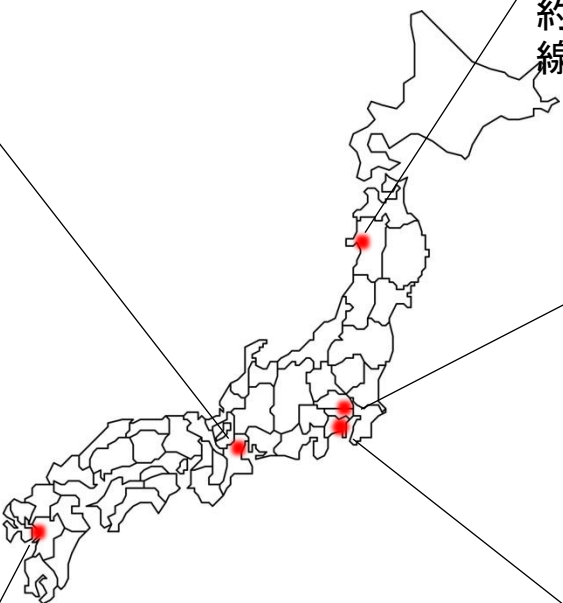


降雨量: 100mm/1時間(気象庁Cバンドレーダ)



2024年7月10日のゲリラ豪雨

横浜市内で内水氾濫が発生。同市の港北区内で下水道管に雨水が大量に流入し、マンホールの蓋が吹き飛んだ



平成27年9月関東・東北豪雨による被害

<概要>

北関東から東北において、記録的豪雨が各所で発生するとともに、鬼怒川水系に線状降水帯による豪雨が集中し、鬼怒川の堤防が決壊した。

<被害>

- ・死者 **8**名(宮城県2名栃木県3名茨城県3名)
- ・行方不明者 **0**名
- ・損壊家屋 **4,000**棟以上
(内訳:全壊 75棟, 半壊 3,851棟, 一部損壊 95棟)
- ・浸水家屋 **12,000**棟以上
(床上浸水 3,147棟, 床下浸水 8,998棟)

<主な河川の被害状況>

堤防決壊

○常総市三坂町地先(鬼怒川左岸21.0km付近)における堤防決壊等に伴う氾濫により、常総市の約1/3の面積に相当する約40km²が浸水し、常総市役所も孤立した。

○9月10日12時50分に常総市三坂町地先(左岸21k付近)で、堤防が約200m決壊。決壊箇所周辺では、氾濫流により多くの家屋が流出した。

常総市(茨城県)

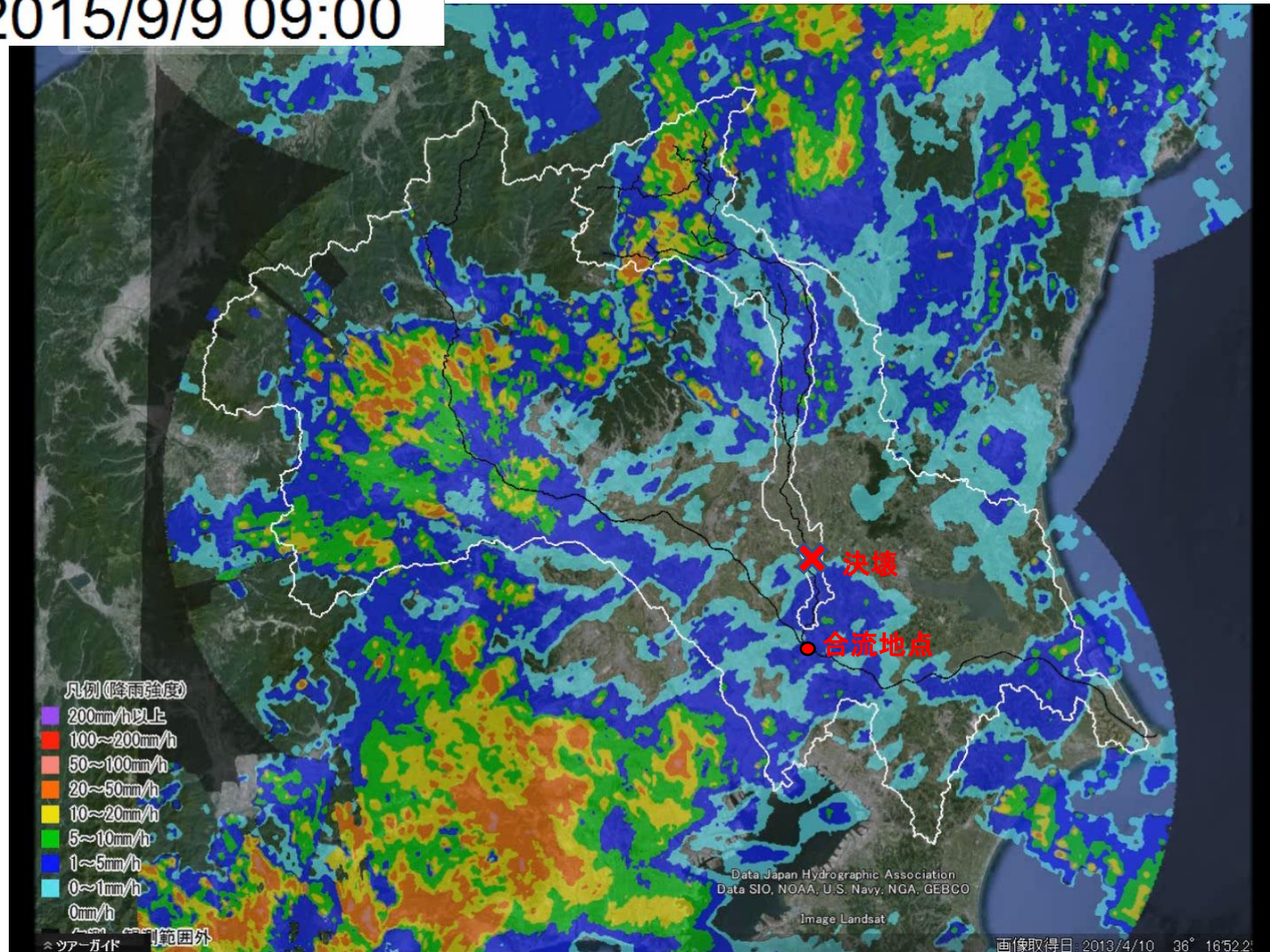


出典:国土交通省関東地方整備局 平成27年9月関東・東北豪雨』に係る 洪水被害及び復旧状況等について」

XRAIN(2015年9月9日09:00から10日09:00)

平成27年関東・東北豪雨(2015)

2015/9/9 09:00

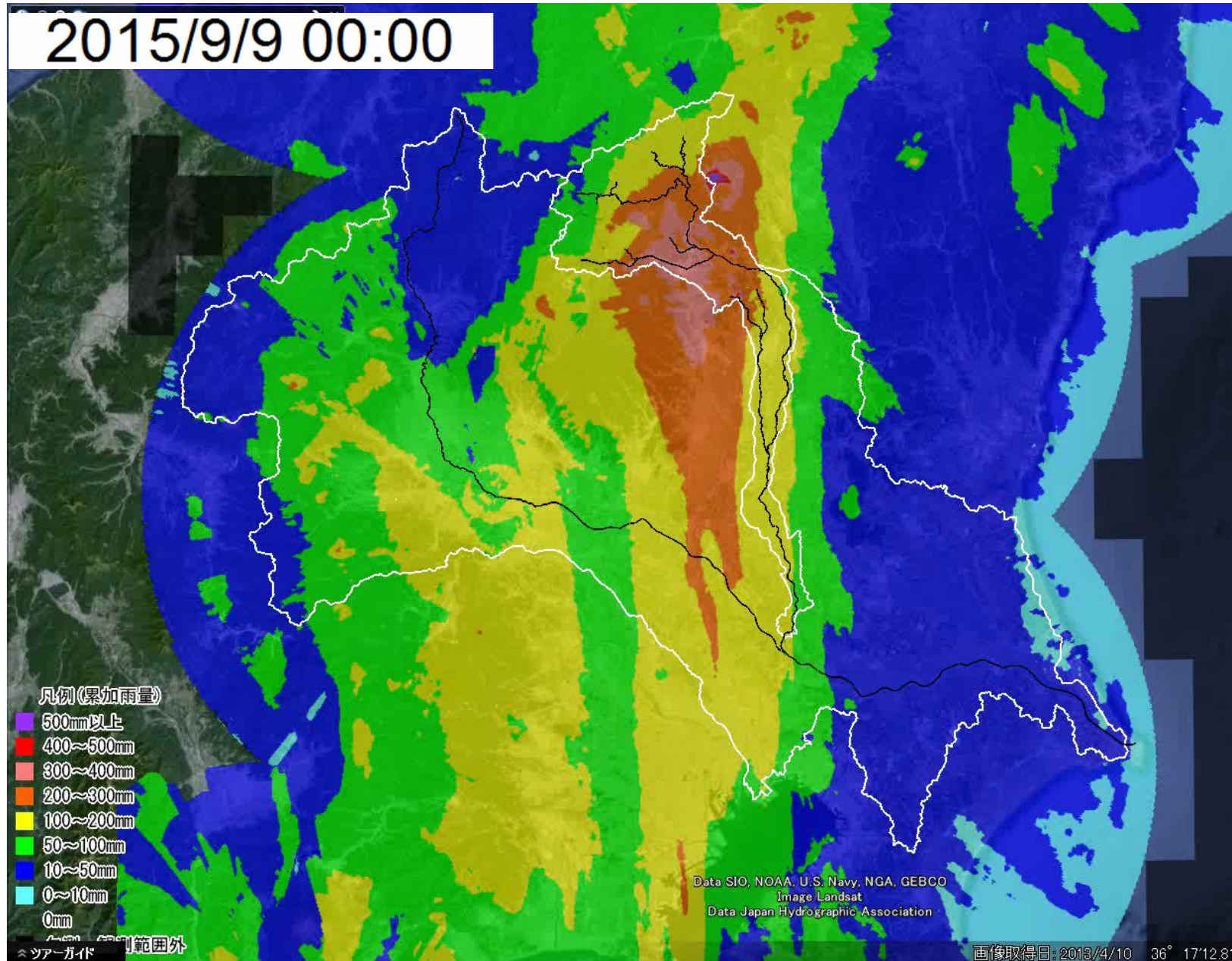


- ・利根川と鬼怒川の合流は河口より82.5kmの地点
- ・決壊地点は利根川合流地点から21kmの地点

鬼怒川流域面積: 1,761[km²]

累積雨量分布(XRAIN 2015年9月9日00:00~24:00)

平成27年関東・東北豪雨(2015)



令和元年台風第19号(及び前線による大雨)の被害状況

<概要>

・台風第19号は12日19時前に大型で強い勢力で伊豆半島に上陸した後、関東地方を通過し関東甲信越地方、東北地方、静岡県や新潟県を中心に広い範囲で記録的な大雨になった。10日からの総雨量は神奈川県箱根町で1,000ミリに達し、東日本を中心に17地点で500ミリを超えた。

<被害>

死者(災害関連死含む) **104**名

行方不明者 **3**名

損壊家屋 **70,000**棟以上

(全壊3,308棟・半壊30,024棟・一部破損37,320棟)

浸水家屋 **30,000**棟以上

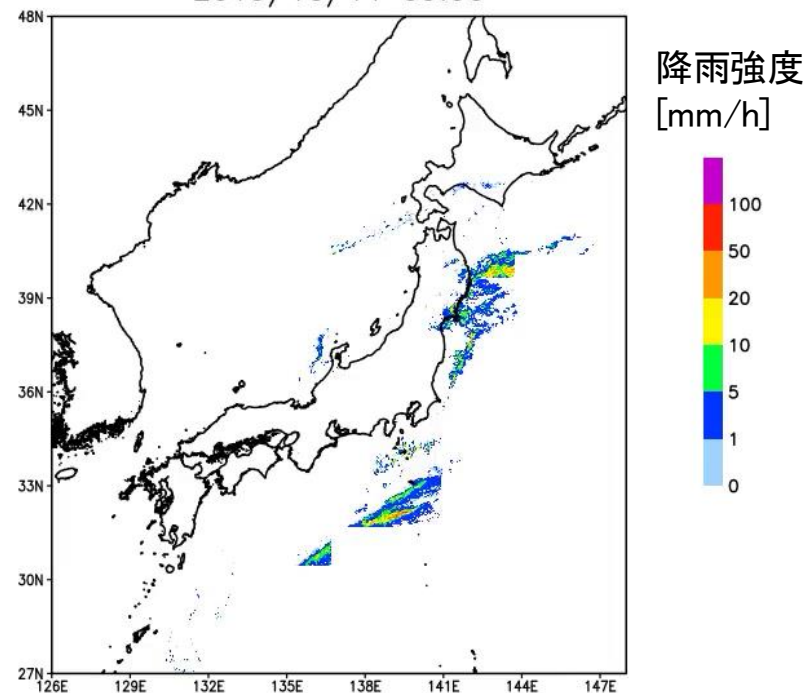
(床上浸水8,129棟・床下浸水22,892棟)

<主な河川の被害状況>

堤防決壊

○広範囲な記録的大雨により、信濃川水系千曲川や阿武隈川水系阿武隈川、荒川水系越辺川・都幾川など、140か所で決壊・氾濫が生じ、約25,000haが浸水した

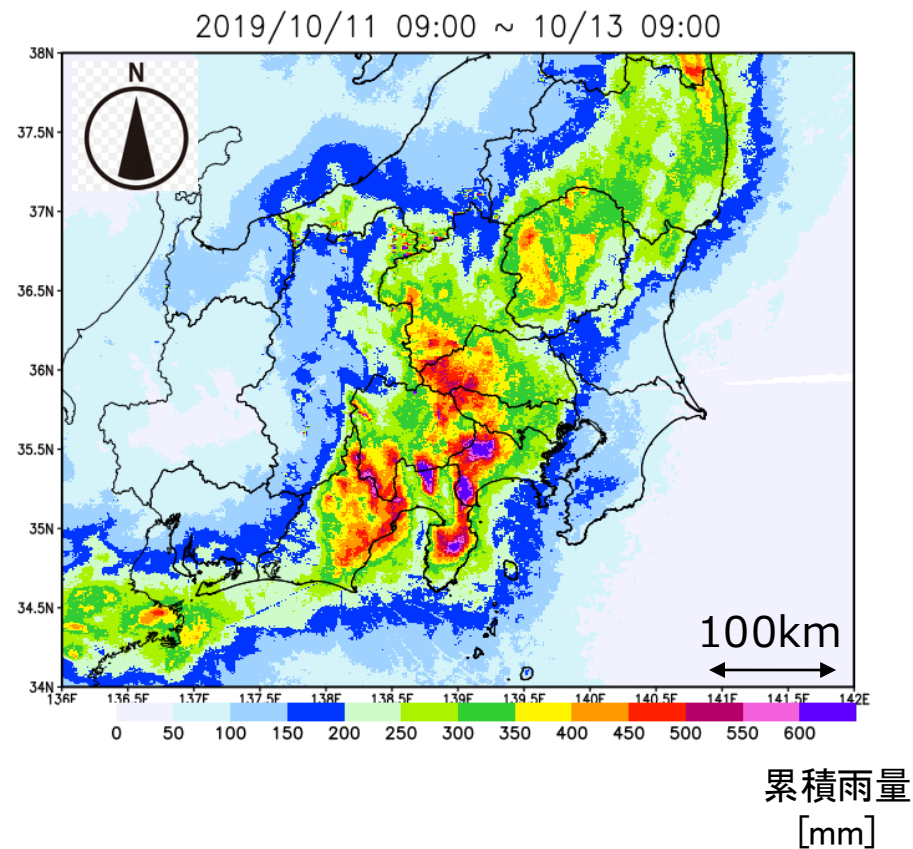
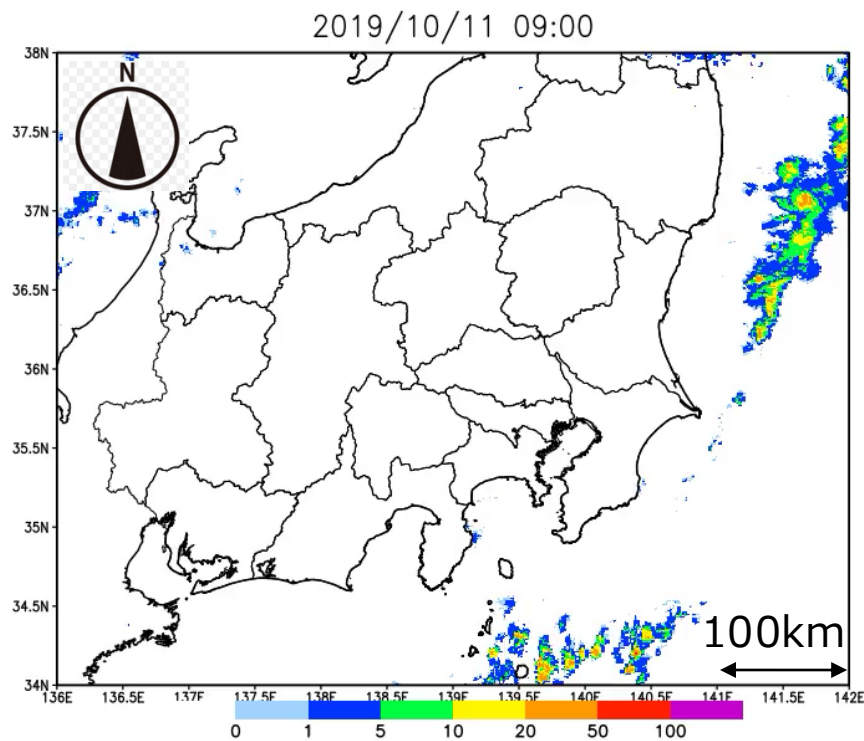
2019/10/11 09:00



出典】共同新聞「台風で19人死亡、16人が不明 千曲川決壊で大規模洪水」<https://this.kiji.is/555887299551888481>

Cバンドレーダーによる雨量動画と累積雨量図 関東中部

10/11 9:00～10/13 9:00



令和元年台風第19号は、太平洋沖から日本に接近・上陸することで、関東甲信・東北地方を中心に大雨をもたらした。

台風第19号と計画降雨量の関係

7河川において、計画降雨量を超えた。

| 河川名 | | 基準点 | 想定確率年 | 計画降雨 | 10月11-12日の 2日間雨量 | 計画降雨 に対する比率 | 最大24時間 雨量 |
|-----|------|------|----------|------------|---------------------|----------------|--------------|
| 関東 | 久慈川 | 山方 | 1/100 確率 | 235 mm/2日 | 256.0 mm | 109% | 247.4 mm |
| | 那珂川 | 野口 | 1/100 確率 | 300 mm/2日 | 306.2 mm | 102% | 295.3 mm |
| | 利根川 | 八斗島 | 1/200 確率 | 336 mm/3日 | 298.7 mm | 89% | 282.4 mm |
| | 渡良瀬川 | 高津戸 | 1/100 確率 | 419 mm/3日 | 370.2 mm | 88% | 354.1 mm |
| | 鬼怒川 | 石井 | 1/100 確率 | 362 mm/3日 | 365.3 mm | 101% | 348.6 mm |
| | 荒川 | 岩淵 | 1/200 確率 | 548 mm/3日 | 417.6 mm | 76% | 401.2 mm |
| | 多摩川 | 石原 | 1/200 確率 | 457 mm/2日 | 473.0 mm | 104% | 453.0 mm |
| | 鶴見川 | 末吉橋 | 1/150 確率 | 405 mm/2日 | 306.1 mm | 76% | 293.2 mm |
| | 相模川 | 厚木 | 1/150 確率 | 460 mm/2日 | 467.8 mm | 102% | 443.8 mm |
| 北陸 | 阿賀野川 | 馬下 | 1/150 確率 | 223 mm/2日 | 171.6 mm | 77% | 164.5 mm |
| | 千曲川 | 立ヶ花 | 1/100 確率 | 186 mm/2日 | 193.7 mm | 104% | 186.8 mm |
| 東北 | 北上川 | 狐禅寺 | 1/150 確率 | 200 mm/2日 | 145.5 mm | 73% | 132.9 mm |
| | 旧北上川 | 和渕 | 1/150 確率 | 267 mm/2日 | 257.7 mm | 97% | 249.0 mm |
| | 鳴瀬川 | 三本木橋 | 1/100 確率 | 322 mm/2日 | 303.3 mm | 94% | 292.7 mm |
| | 吉田川 | 落合 | 1/100 確率 | 335 mm/2日 | 268.1 mm | 80% | 260.9 mm |
| | 名取川 | 名取橋 | 1/150 確率 | 362.8mm/2日 | 335.9 mm | 93% | 330.4 mm |
| | 広瀬川 | 広瀬橋 | 1/150 確率 | 388.4mm/2日 | 312.8 mm | 81% | 307.4 mm |
| | 阿武隈川 | 福島 | 1/150 確率 | 256.5mm/2日 | 269.8 mm | 105% | 267.5 mm |

※ 計画降雨量超過河川を示す

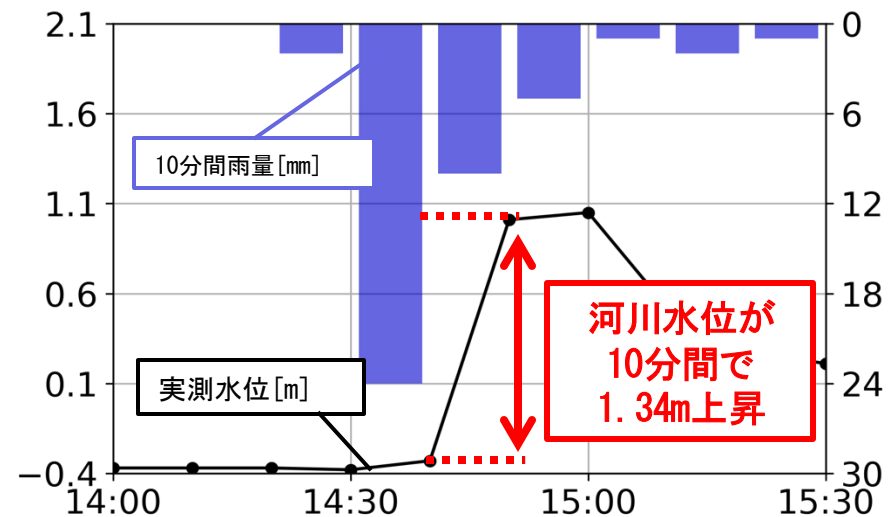
【出典】日本気象協会：防災レポート<https://www.jwa.or.jp/news/2019/11/8535/>

都賀川豪雨

2008年7月28日、兵庫県神戸市を流れる都賀川で、局地的大雨が発生し、当時河川で遊んでいた児童を含む5名が逃げ遅れて流され、死亡。

出典: 土木学会都賀川水難事故調査団: 都賀川水難事故調査について

2008/07/28/13:00

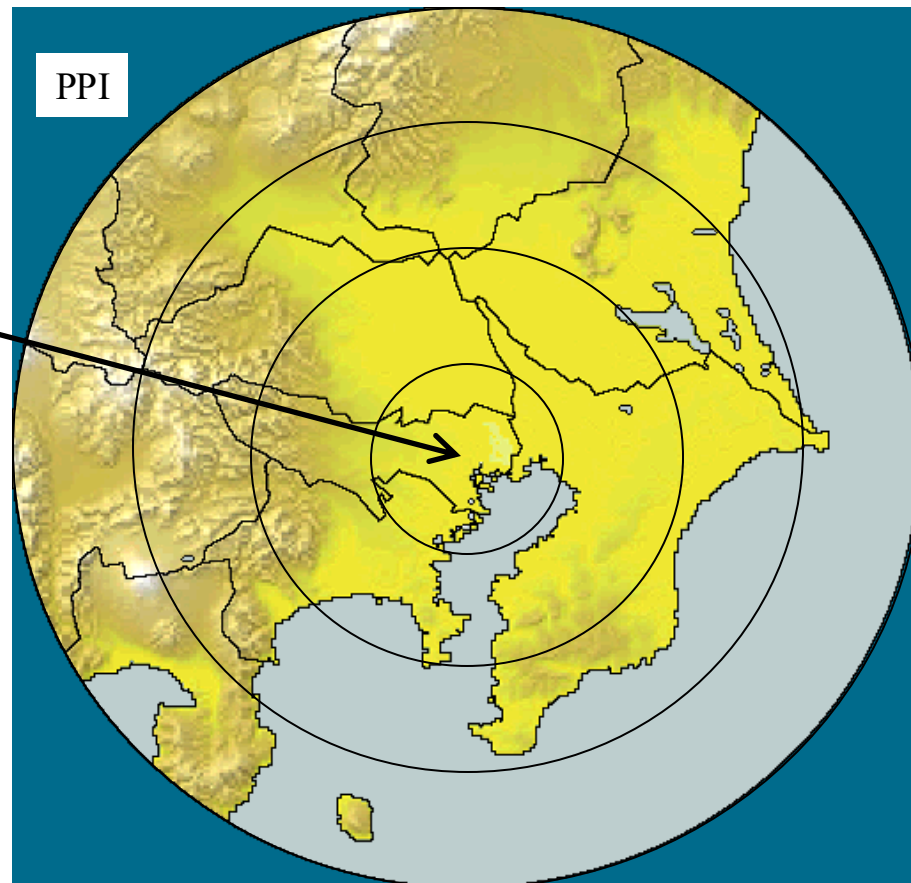


【出典】「土木学会都賀川水難事故調査団
都賀川水難事故調査について」よりグラフ作成

局地的大雨の発達予測には、1分1秒でも早い現象の捕捉技術が望まれる

ドップラーレーダを用いた集中豪雨の観測

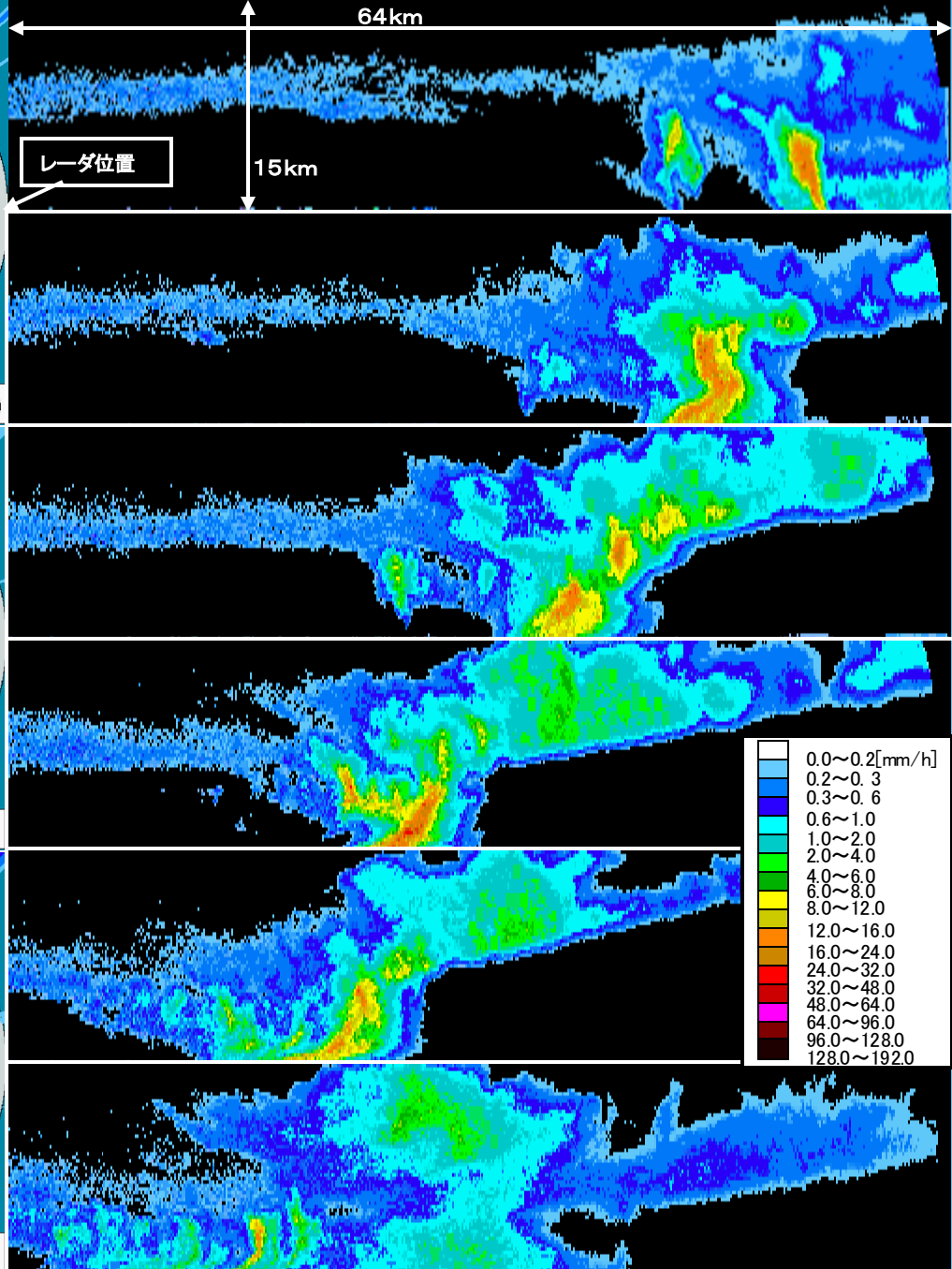
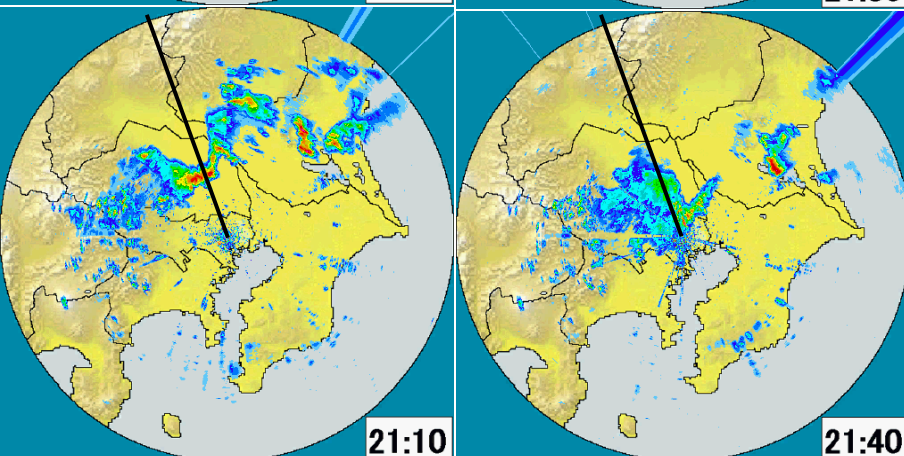
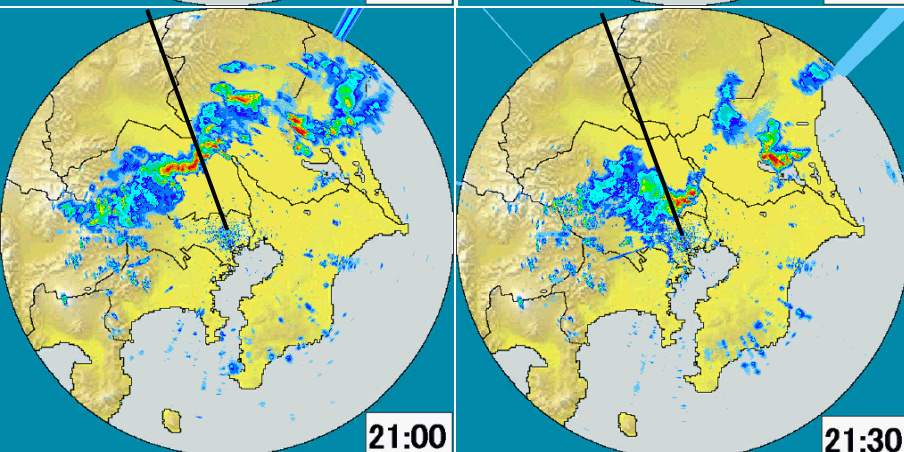
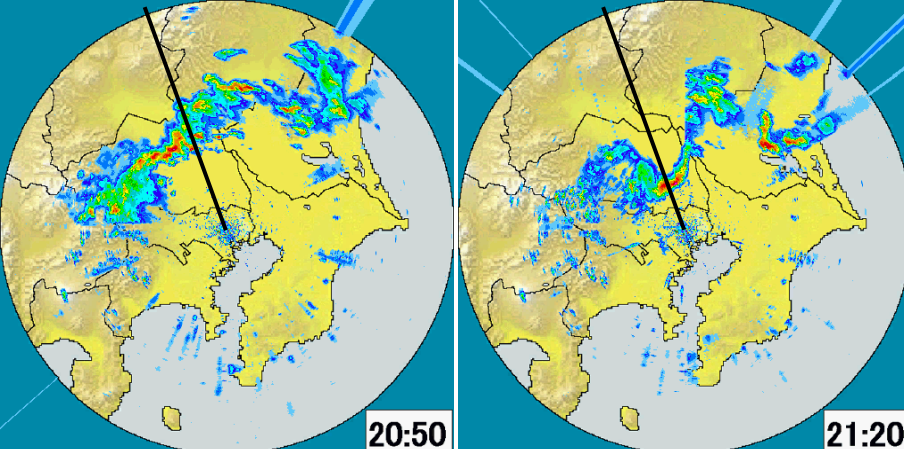
中央大学ドップラーレーダーの概要



| | Intensity Mode | Doppler Mode |
|---------|----------------|--------------|
| 周波数 | 9445MHz | 9445MHz |
| パルス幅 | 0.9 μ s | 0.45 μ s |
| 繰り返し周波数 | 1000MHz | 2000MHz |
| 観測範囲 | 128km | 64km |
| 観測分解能 | 250m | 125m |
| 分解能角度方向 | 0.7° | 0.7° |

観測範囲 : 256km

中央大学ドップラーレーダー
1995年設置（東京都文京区春日）



2002.8.1 20:50~21:40 前線組織 北部山地発生南下東進型

20:50~21:40 上の図から10間隔 方位340度高さ15km 幅64km 左がレーダ位置

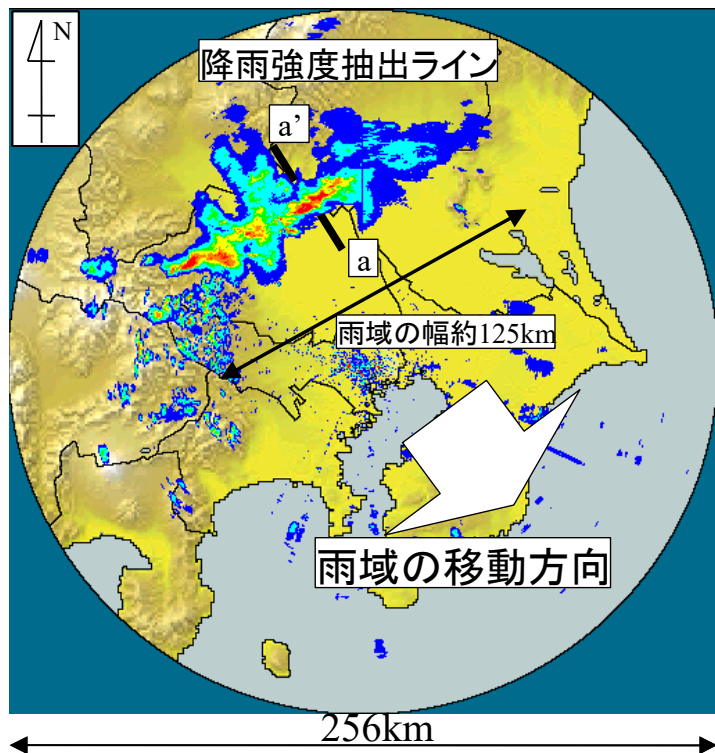


図1 レーダ雨量計により捉えた豪雨の平面図

関東北西部の山地で発生し帯状の雨域を形成し発達しながら南東方向へ移動。移動速度約40km/h。雨域の幅約125km。1997年7月19日19時10分

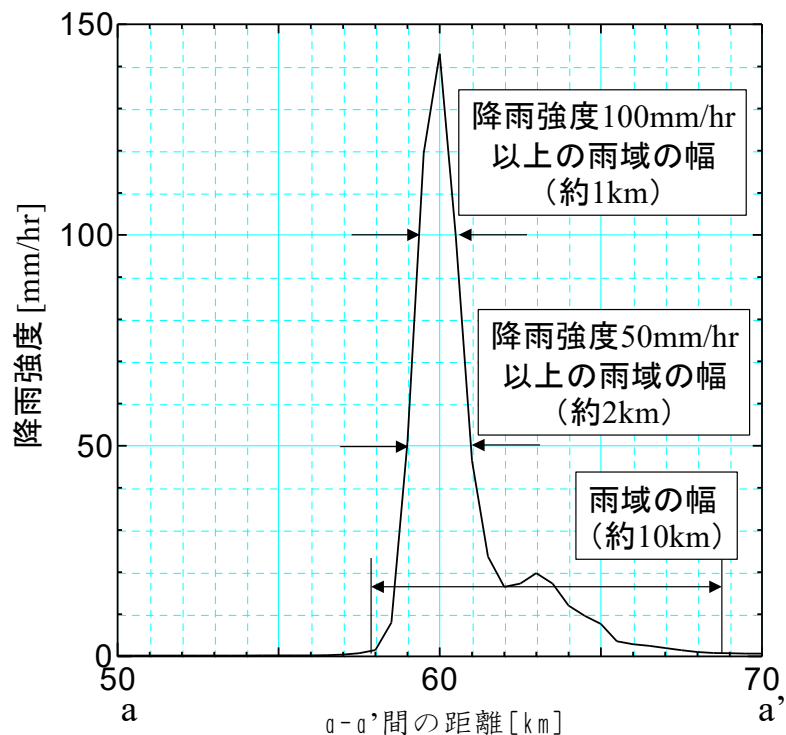
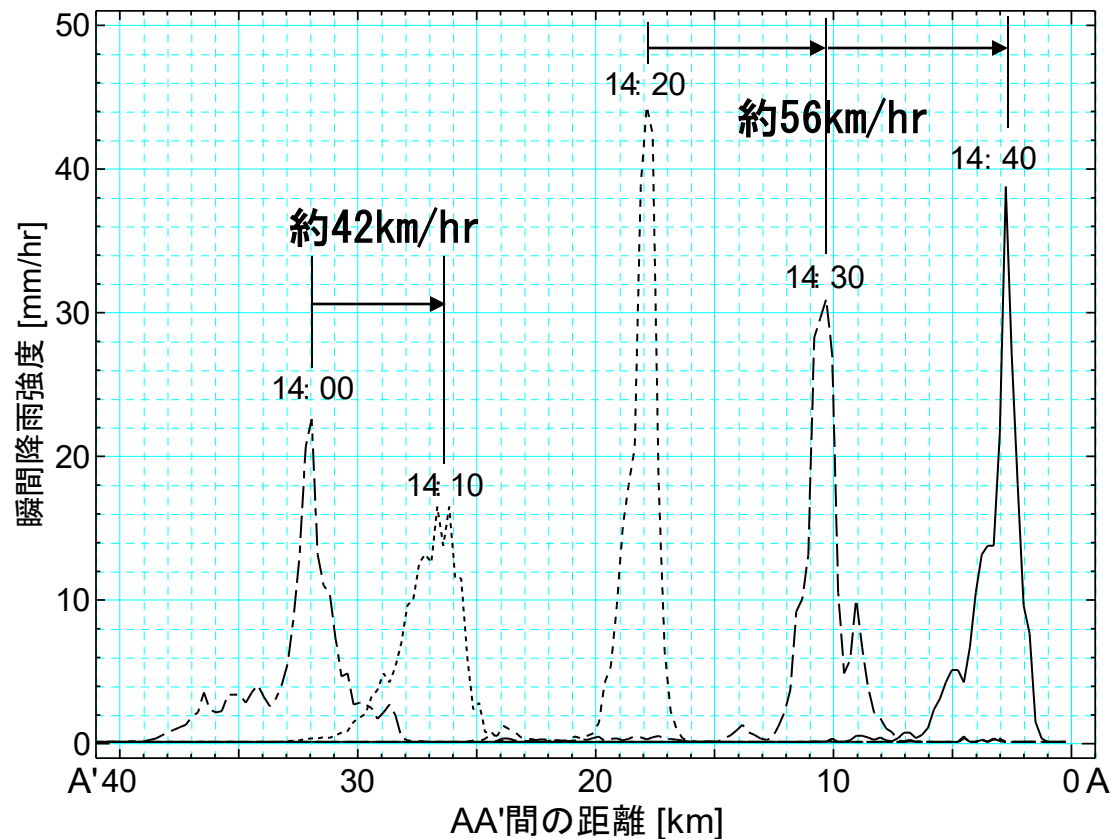


図2 a-a'間の縦割り画像の降雨強度分布

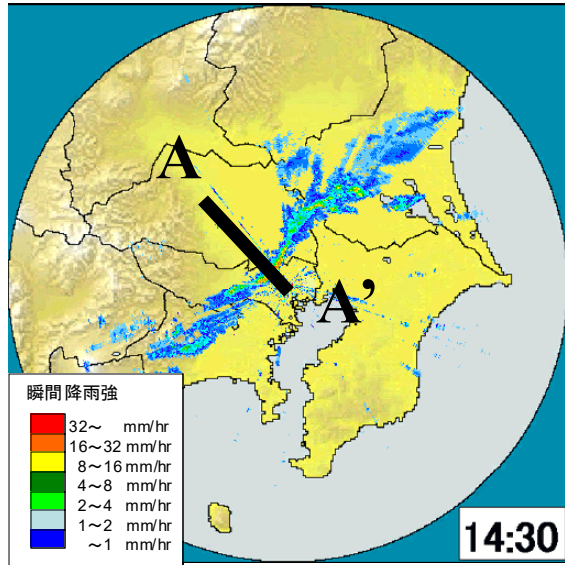
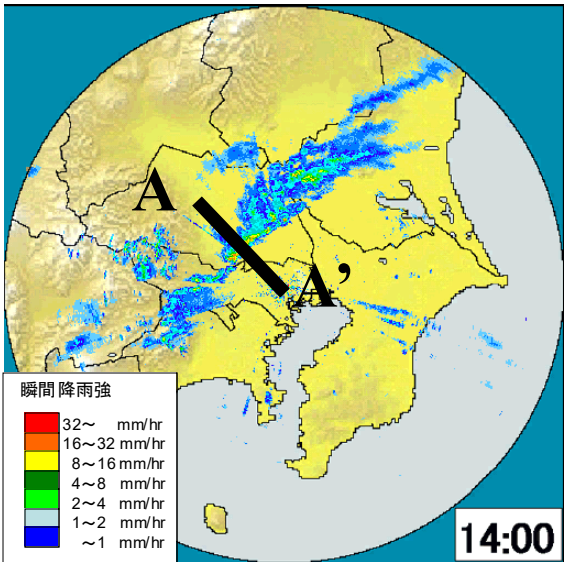
瞬間降雨強度100mm/h以上の部分は幅1km程度。50mm/h以上の部分も2km程度で、豪雨となっている場所は1～2km程度である。

各時間帯における降雨域の場所と瞬間降雨強度



AA'間における各時間の降雨域の場所と瞬間降雨強度

| 時間 | 14:00,14:10 | 14:20－14:40 |
|---------|-------------|-------------|
| 瞬間降雨強度 | 20mm/hr 程度 | 30mm/hr以上 |
| 雨域の移動速度 | 約42km/hr | 約56km/hr |



降雨強度が増加→雨域の移動速度が増加

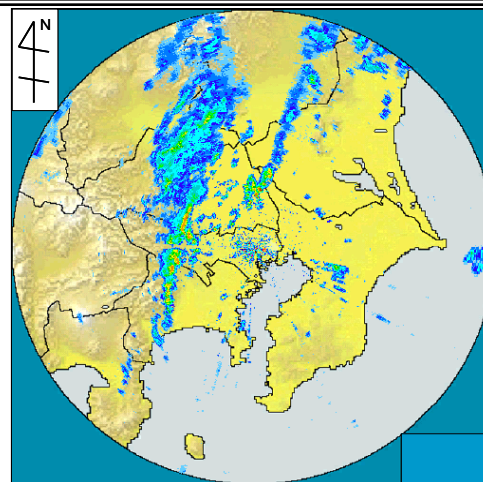
2005年4月26日
14:00, 14:30のレーダ画像

関東平野における集中豪雨

メソ- α スケール降雨
(約2000~200km)

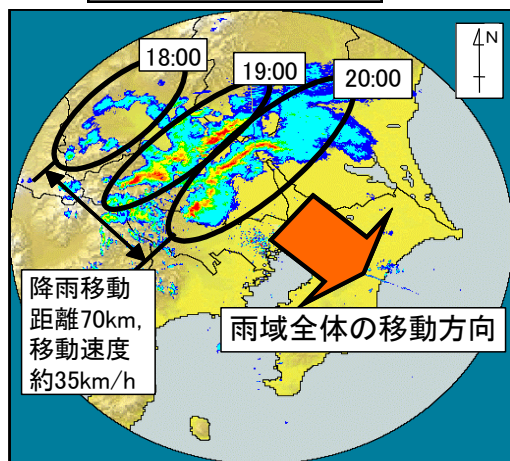
メソ- β スケール降雨
(約200~20km)

線状降水帯による集中豪雨



積乱雲が線状に並び新しく発生した積乱雲を吸収・併合しながら線状の雨域を維持し、同一地点に長時間留まるものである。

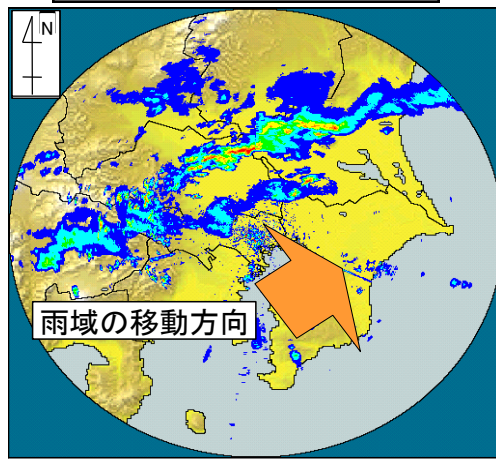
前線組織型



降雨移動
距離70km,
移動速度
約35km/h

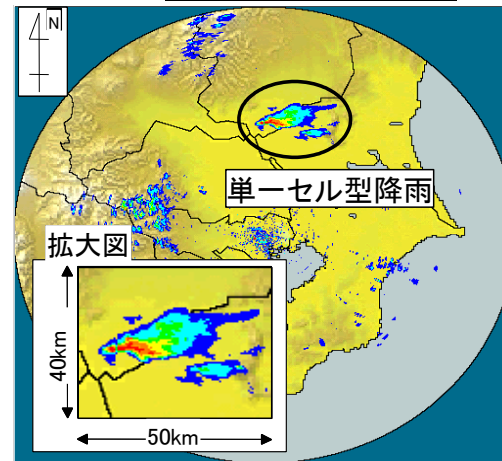
雨域全体の移動方向

複数セル移動型



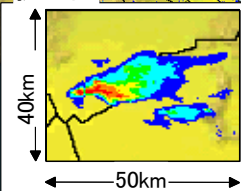
雨域の移動方向

単一セル型



単一セル型降雨

拡大図

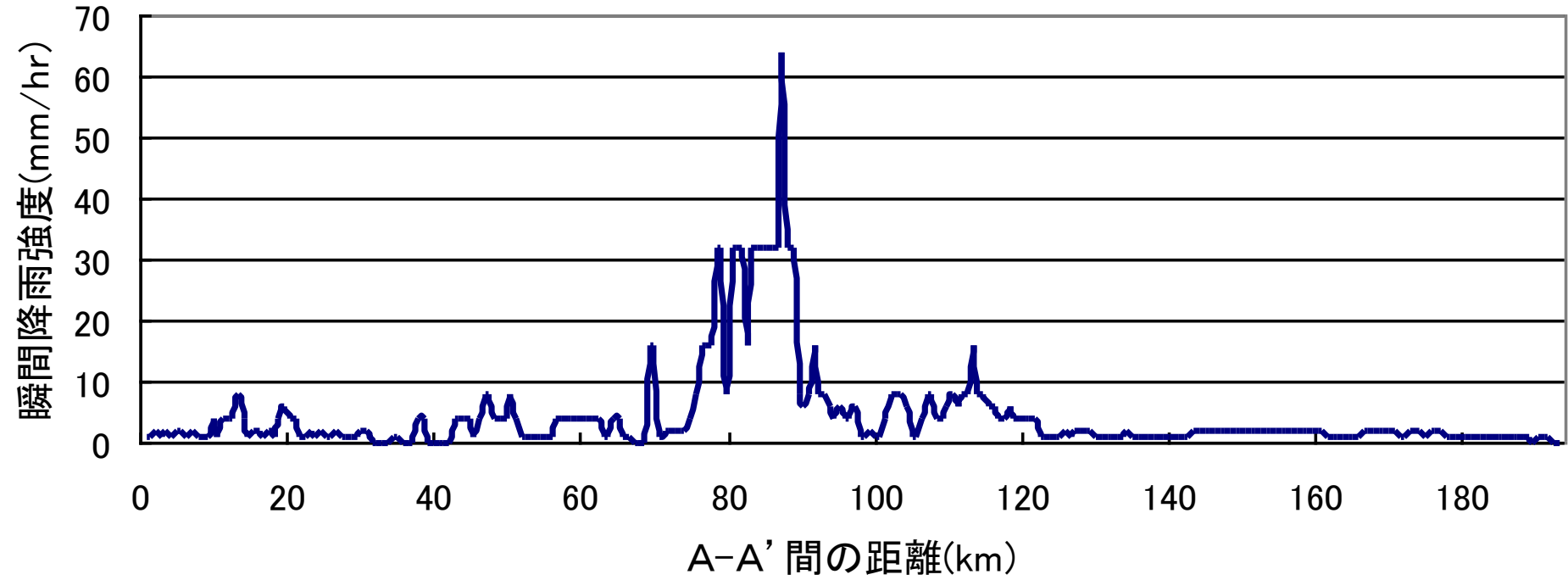
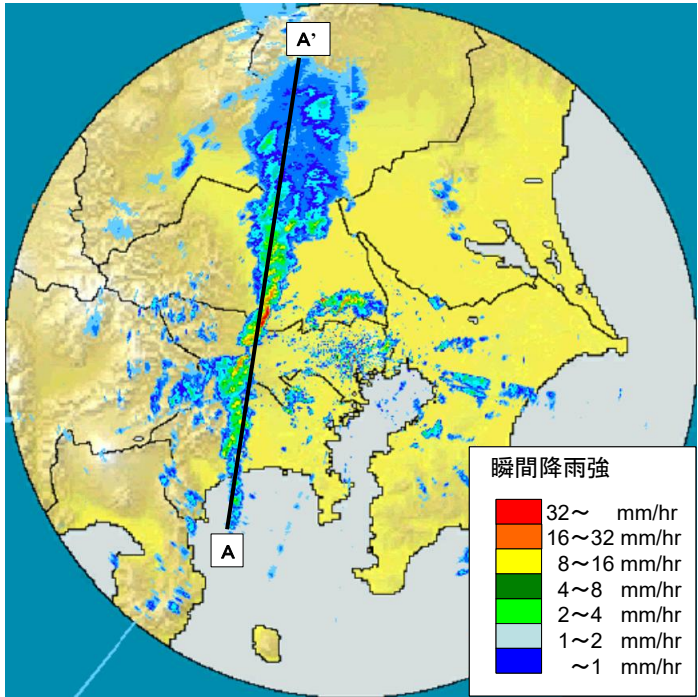


一地点にセルが発生し、移流することなく同地点で発達・消滅するものや、上空の風により移流され数個の降水セルを次々に発生させるものが存在する。

雨域は関東北西部または西部の山岳地で発生し、前線面に垂直な方向に移動する。

降水セルの移動方向と同方向に雨域を成長させ進行方向に長い帯状の雨域を形成する。

線状降水帯における降雨域の
場所と瞬間降雨強度(2003年8月8日)



10分間降雨量と1時間降雨量の比較

降雨の定義

○「**一降雨**」: 10分間降雨量で0.5mm以上の降雨を観測したところを降雨開始として0mmが3時間継続したところまでを降雨終了とする。一降雨期間中の総降雨量が5mm以上であるものとする

○「**一降雨の最大10分間降雨強度**」: 一降雨の最大10分間降雨量を6倍した降雨量

○「**一降雨の1時間降雨量**」: 最大10分間降雨量を含む前後の雨量が最大となるように1時間分を積算した降雨量

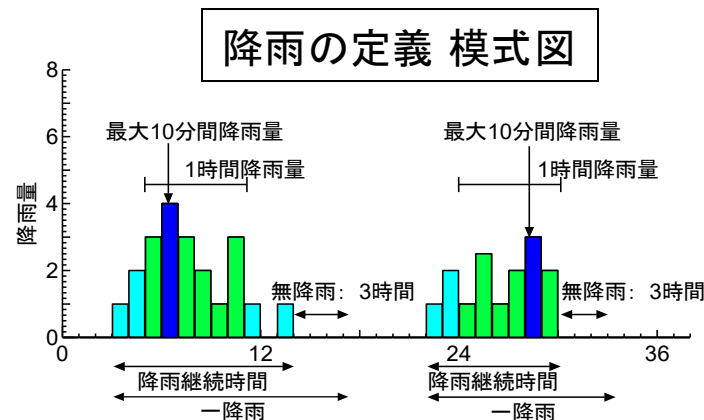
使用データ

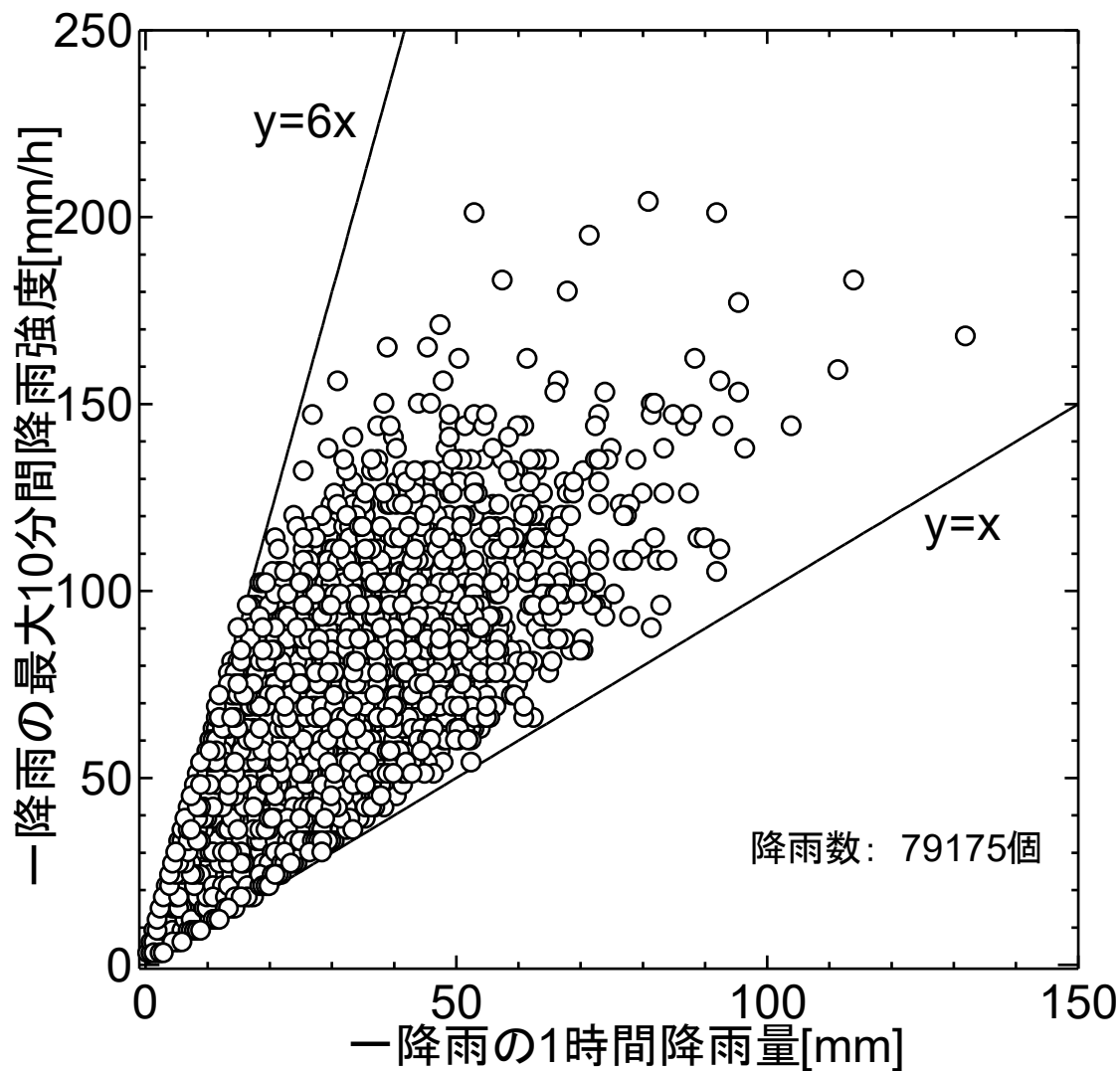
○AMeDAS10分値雨量 (1995/1～2004/12 10年間)

対象地域

○関東地方 120地点

群馬, 栃木, 茨城, 埼玉, 千葉, 東京, 神奈川



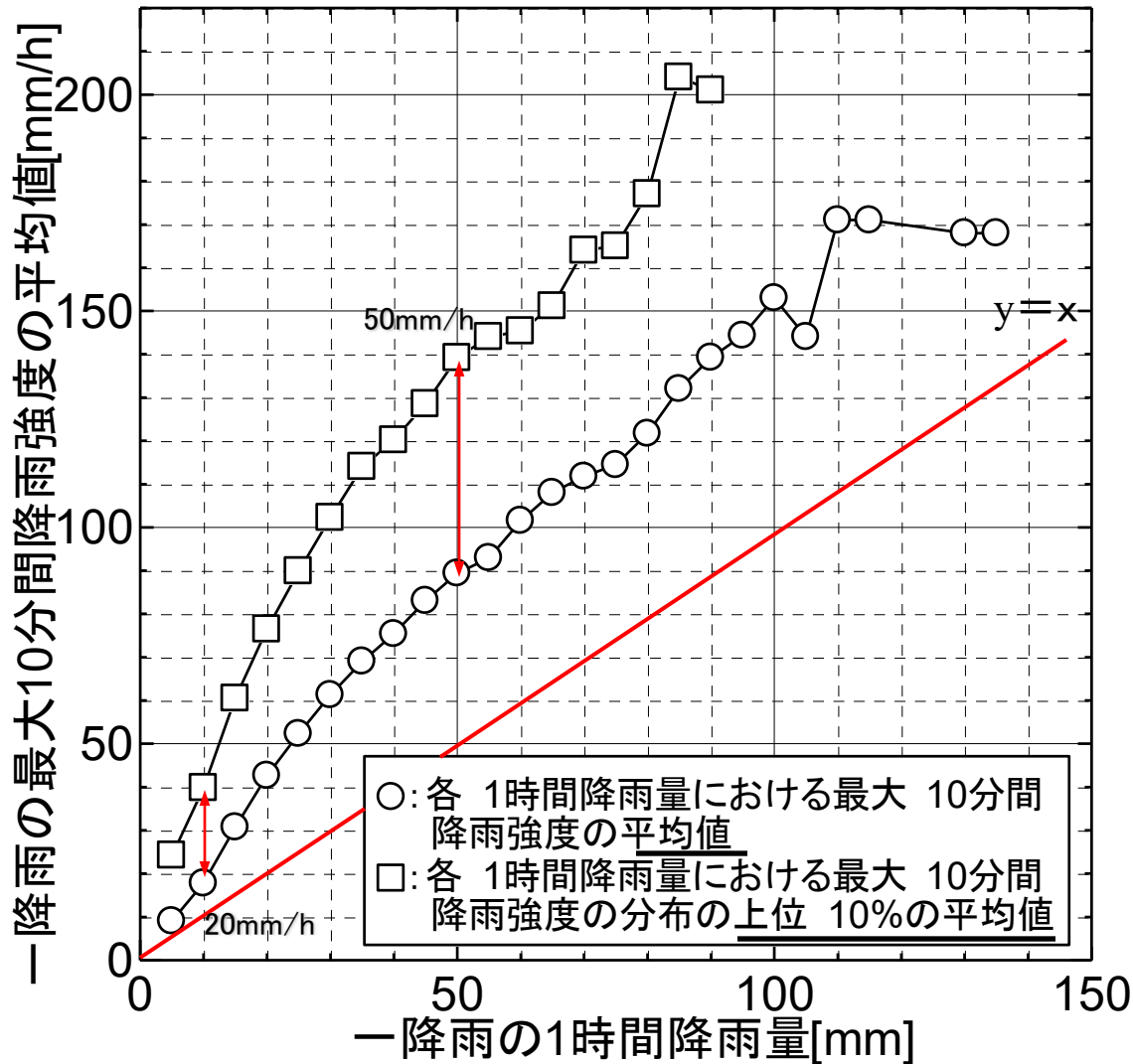


1995/1～2004/12 10年間
164地点
降雨数: 79175

| | |
|----------------|------------|
| 最大10分間降雨強度の平均値 | 15.4[mm/h] |
| 1時間降雨量の平均値 | 7.0[mm] |
| 総降雨量の平均値 | 23.5[mm] |
| 降雨継続時間の平均値 | 10.0[h] |

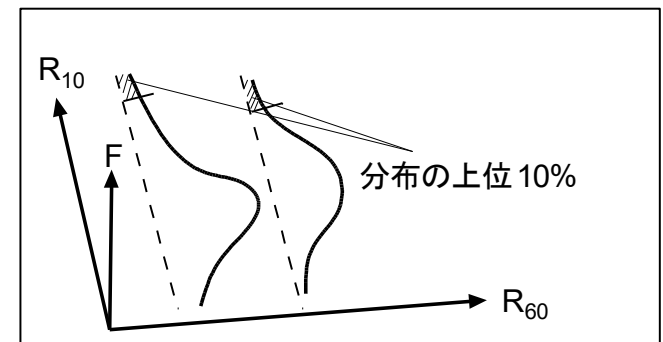
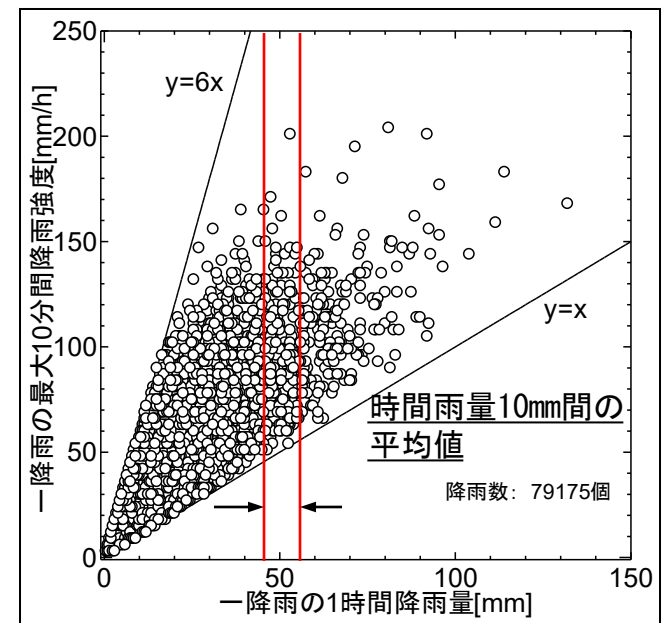
最大10分間降雨強度と1時間降雨量の関係

- 最大10分間降雨強度は1時間降雨量の1～6倍の範囲に分布
- 1時間降雨量が大きくなるにつれ分散が大きくなる



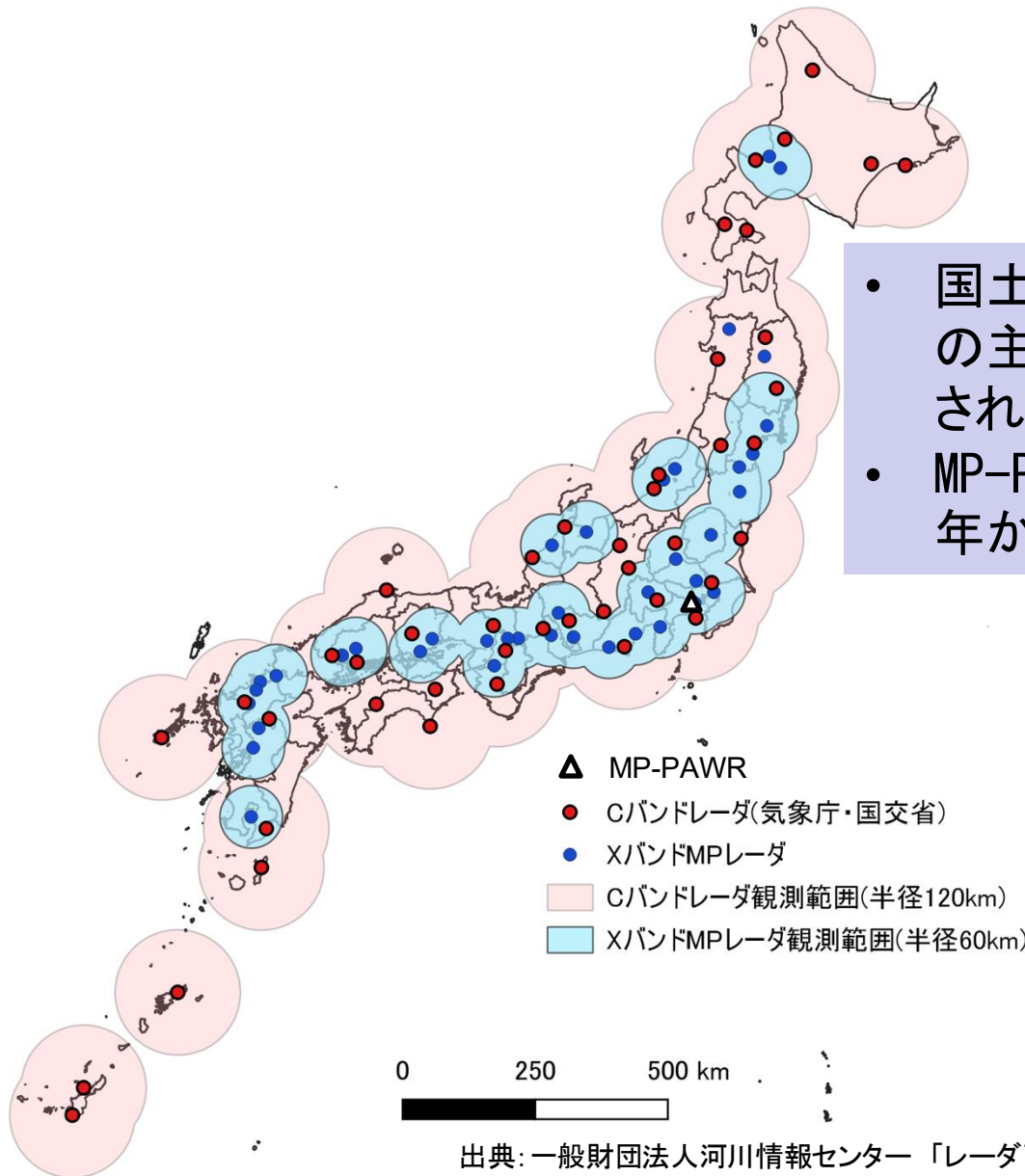
最大10分間降雨強度の平均値と 1時間降雨量の関係

- 線形関係にはならない。
- 各1時間降雨量における最大10分間降雨強度の平均値は1時間降雨量の1.5～2倍。
- 上位10%の平均値では平均値より20～50mm/h高い値を示し1時間降雨量の2.5～3倍。



マルチパラメータ・フェーズドアレイ気象 レーダ (MP-PAWR: Multi Parameter Phased Array Weather Radar) の概要とその活用

日本の気象レーダ網



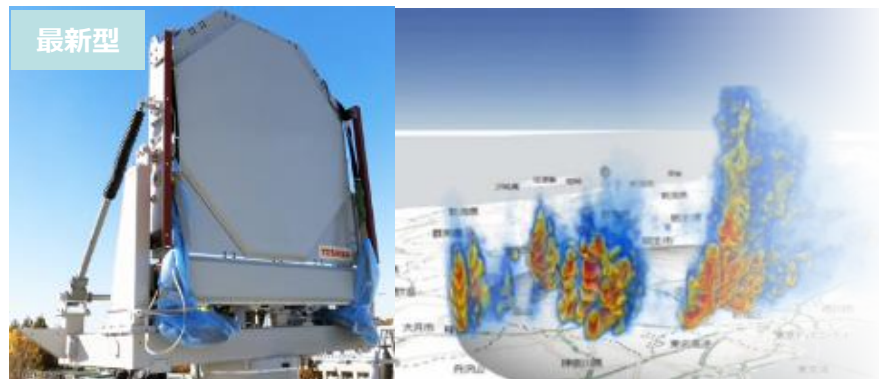
- 国土交通省はXバンドMPレーダを全国の主要な都市に設置され、**39基**が運用されている。
- MP-PAWRはSIPにより設置され、2018年から実証試験用として運用が開始。

**Cバンドレーダ(国交省・気象庁)
:26基(うち16基がMP化)**

XバンドMPレーダ:39基

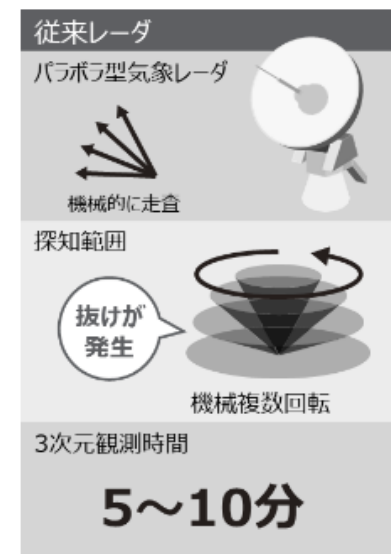
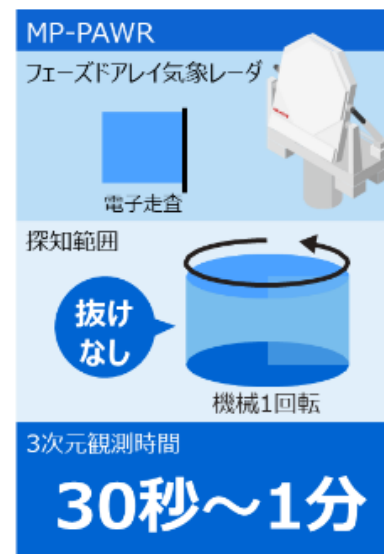
MP-PAWR:1基

MP-フェーズドアレイ気象レーダについて



2017- MP-PAWR
設置場所：埼玉

- フェーズドアレイ気象レーダは内閣府 SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）で開発した世界最先端のレーダ（防衛レーダ技術の活用）
- 世界で唯一の実用型二重偏波フェーズドアレイ気象レーダ

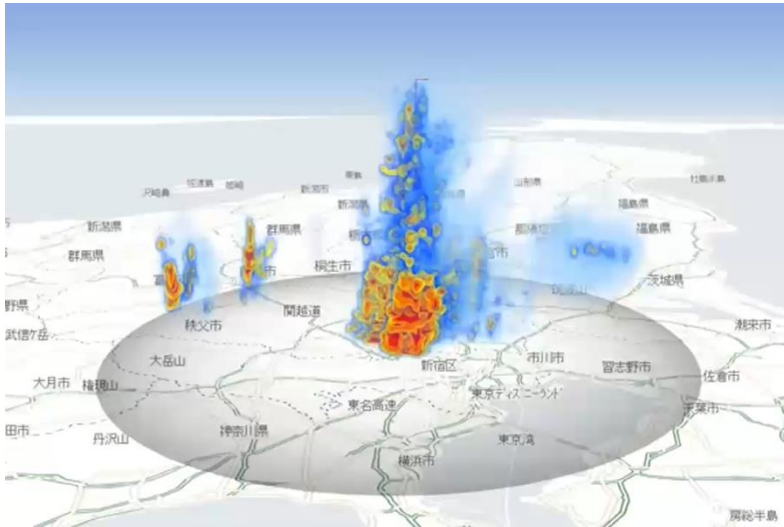


従来のパラボラ型レーダとフェーズドアレイ気象レーダの比較

豪雨被害で問題の線状降水帯やゲリラ豪雨の早期把握に極めて有効
→ 流域治水で活用

MP-フェーズドアレイ気象レーダによる観測

動画



三次元降雨観測結果



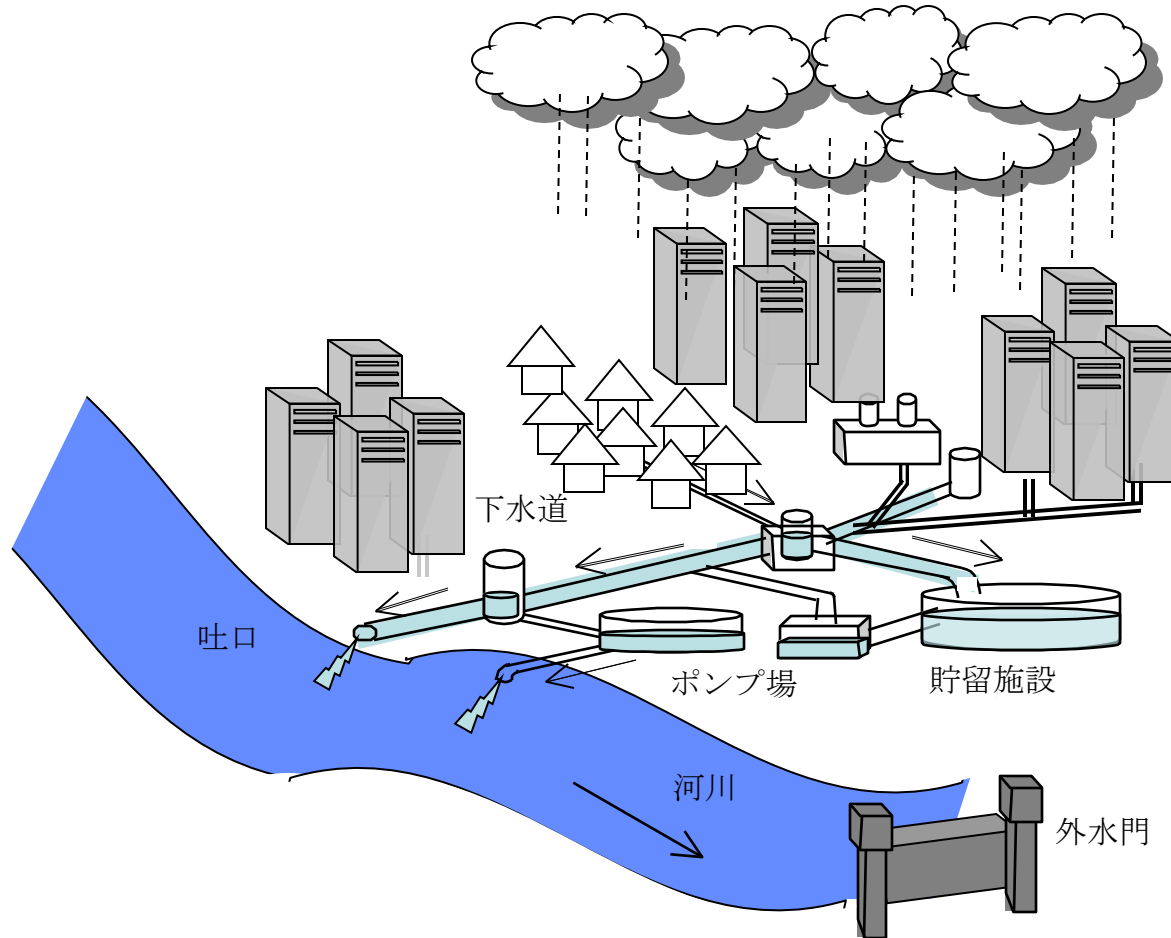
三次元降雨・風観測結果

レーダサイトを中心に半径60kmを30秒毎に、半径80kmを60秒毎に
3次的に観測することができる

注)動画は60秒毎の更新。

動画提供: 東芝インフラシステムズ株式会社

効率的な雨水排水対策案の検討





対象流域

・排水区面積: 12.04[ha]

・マンホール数: 53[個]

＜雨水排水対策＞

① 管渠布設替え 

② ポンプ場の新設 

③ 貯留施設の新設 

B川

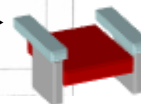
A市B川排水区

・排水区数: 19排水区

・排水区面積: 5.8[km²]

＜雨水排水対策＞

① 外水門の新設

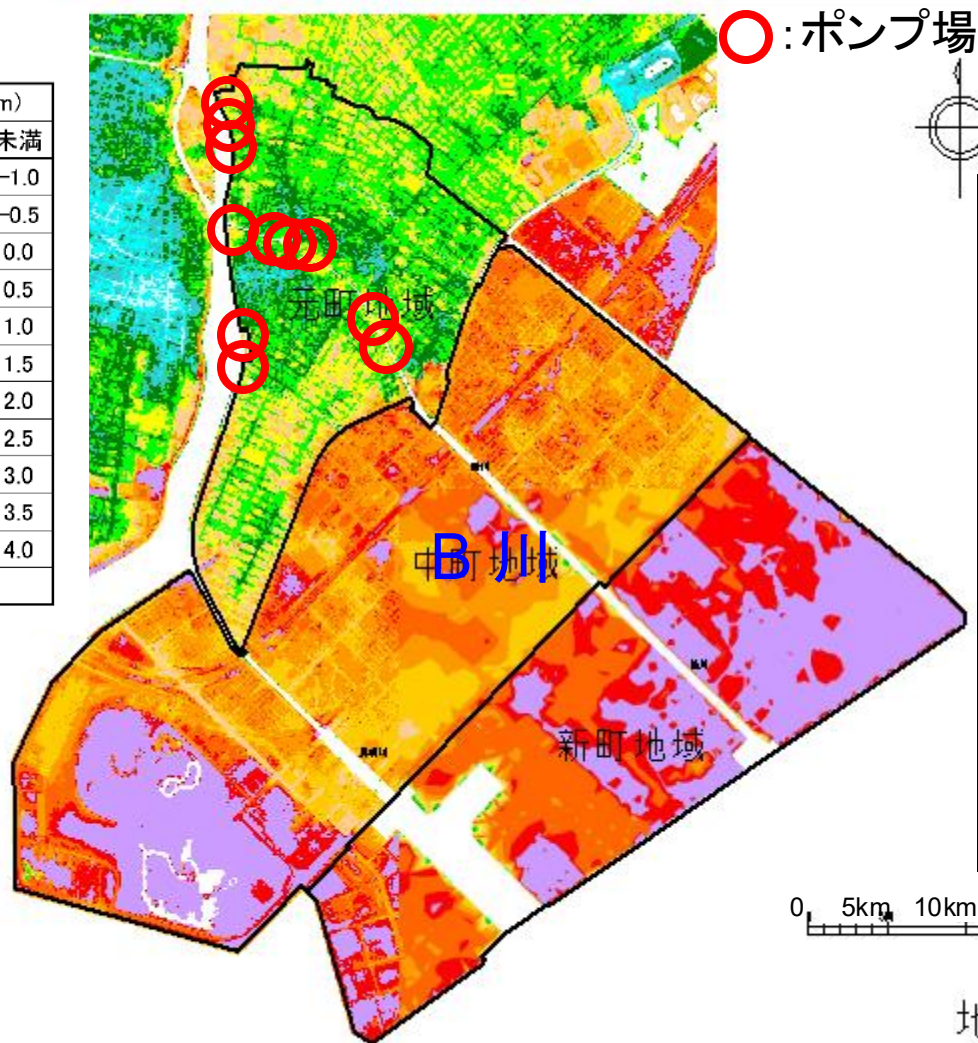


対象流域

S市

< 凡 例 >

| 色 | 地盤高(T.P.m) | | |
|---|------------|---|------|
| | 以上 | ～ | 未満 |
| | | ～ | -1.0 |
| | -1.0 | ～ | -0.5 |
| | -0.5 | ～ | 0.0 |
| | 0.0 | ～ | 0.5 |
| | 0.5 | ～ | 1.0 |
| | 1.0 | ～ | 1.5 |
| | 1.5 | ～ | 2.0 |
| | 2.0 | ～ | 2.5 |
| | 2.5 | ～ | 3.0 |
| | 3.0 | ～ | 3.5 |
| | 3.5 | ～ | 4.0 |
| | 4.0 | ～ | |



問題点

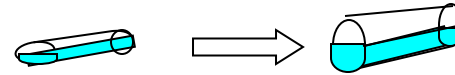
○地盤高が河川水位より低い地域はポンプで雨水を汲み上げ川に排水。

○地盤沈下の影響で一部管渠が逆勾配になっている。

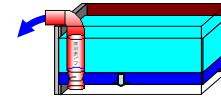
効率的な雨水排水対策案の検討

0) 現況の管路網施設

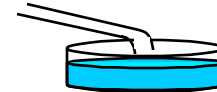
1) 管渠布設替え(管渠の管径を拡張化)



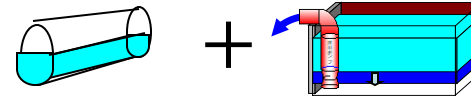
2) ポンプ場の新設(排水能力量: $2.8[\text{m}^3/\text{s}]$)



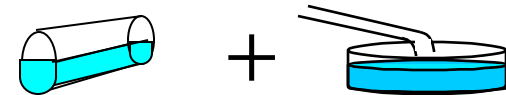
3) 地下貯留施設の新設(貯留面積: $1100[\text{m}^2]$)



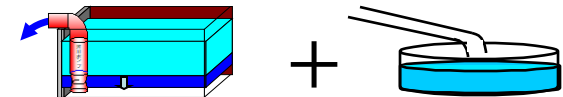
4) 管渠布設替え+ポンプ場の新設



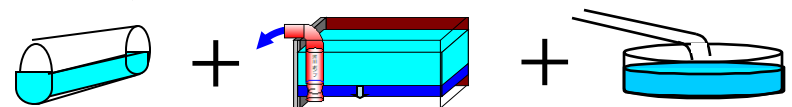
5) 管渠布設替え+地下貯留施設の新設



6) ポンプ場の新設+地下貯留施設の新設

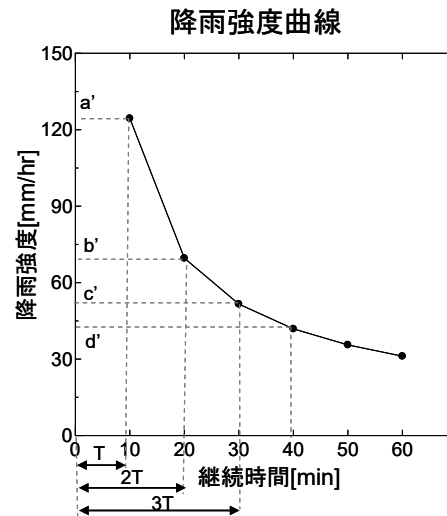
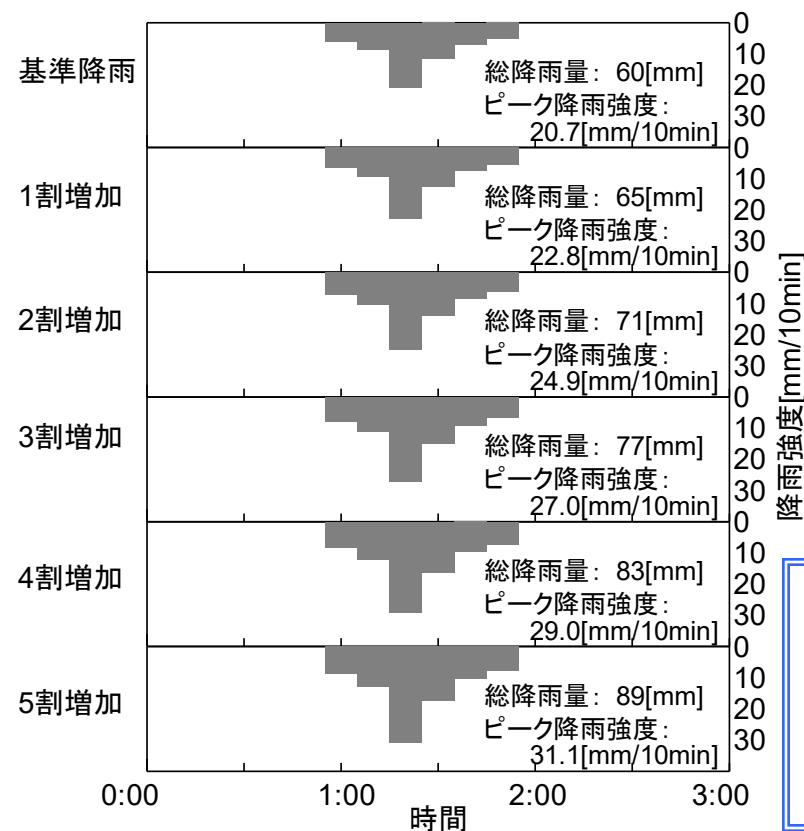


7) 管渠布設替え+ポンプ場の新設+地下貯留施設の新設

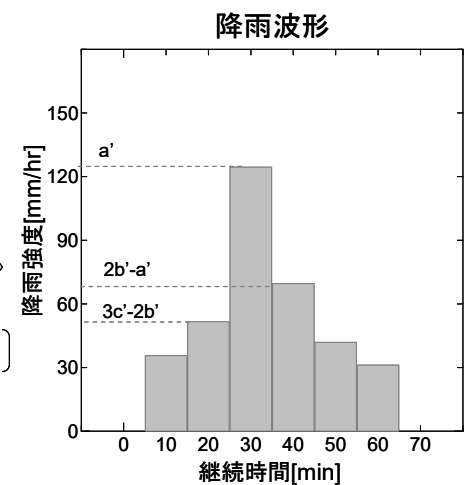


仮想した降雨

| 降雨強度 | R: 基準降雨 | 1.1R | 1.2R | 1.3R | 1.4R | 1.5R |
|-----------------------|---------|------|------|------|------|------|
| 総降雨量[mm] | 60 | 65 | 71 | 77 | 83 | 89 |
| ピーク降雨強度 [mm/10min] | 20.7 | 22.8 | 24.9 | 27.0 | 29.0 | 31.1 |
| 降雨規模(確率年) | 8 | 12 | 20 | 35 | 50 | 75 |



降雨波形
への変換



降雨強度式

$$r = \frac{a}{t^n + b}$$

t: 降雨継続時間

a, n, b: 地域ごとに決まる定数

東京都の
60mm/hr対応の
降雨強度式

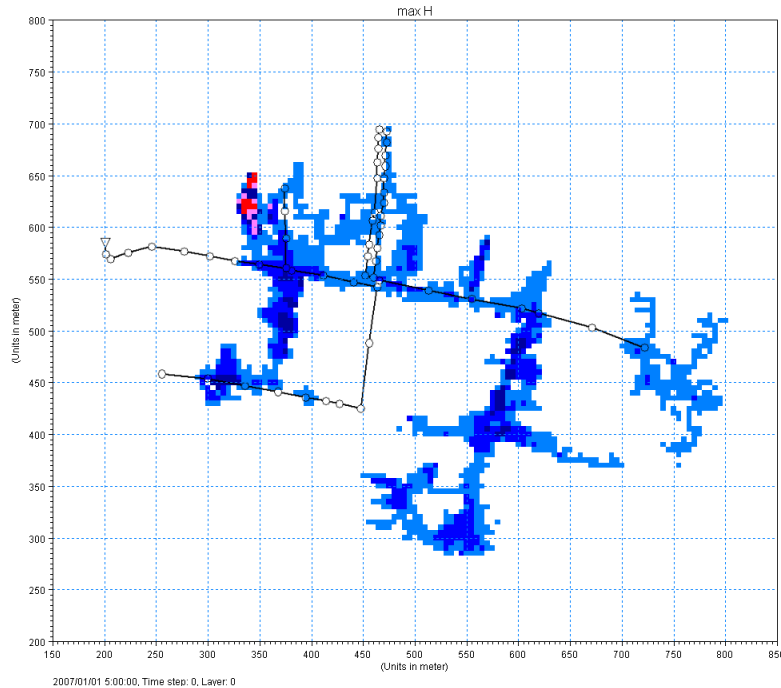
$$r = \frac{1200}{t^{2/3} + 5.00}$$

氾濫計算結果

➤対象降雨: 1.5r

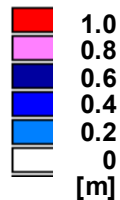
(r: 基準降雨を1.5倍した降雨)

現況の管路網施設

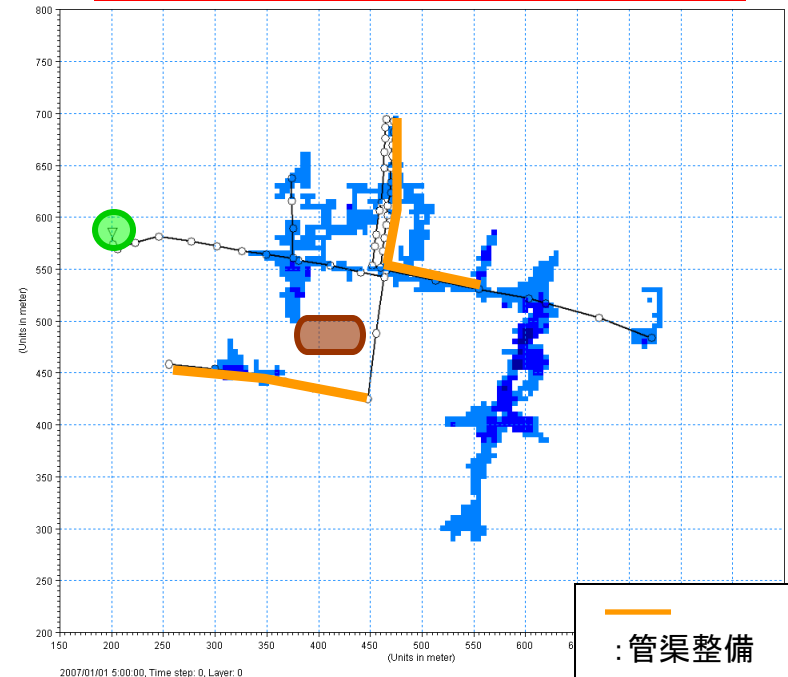


最大湛水深: 0.88[m]
湛水面積: 22,600[m²]

最大
湛水深



管渠敷設替え+ポンプ場新設
+貯留施設新設の整備



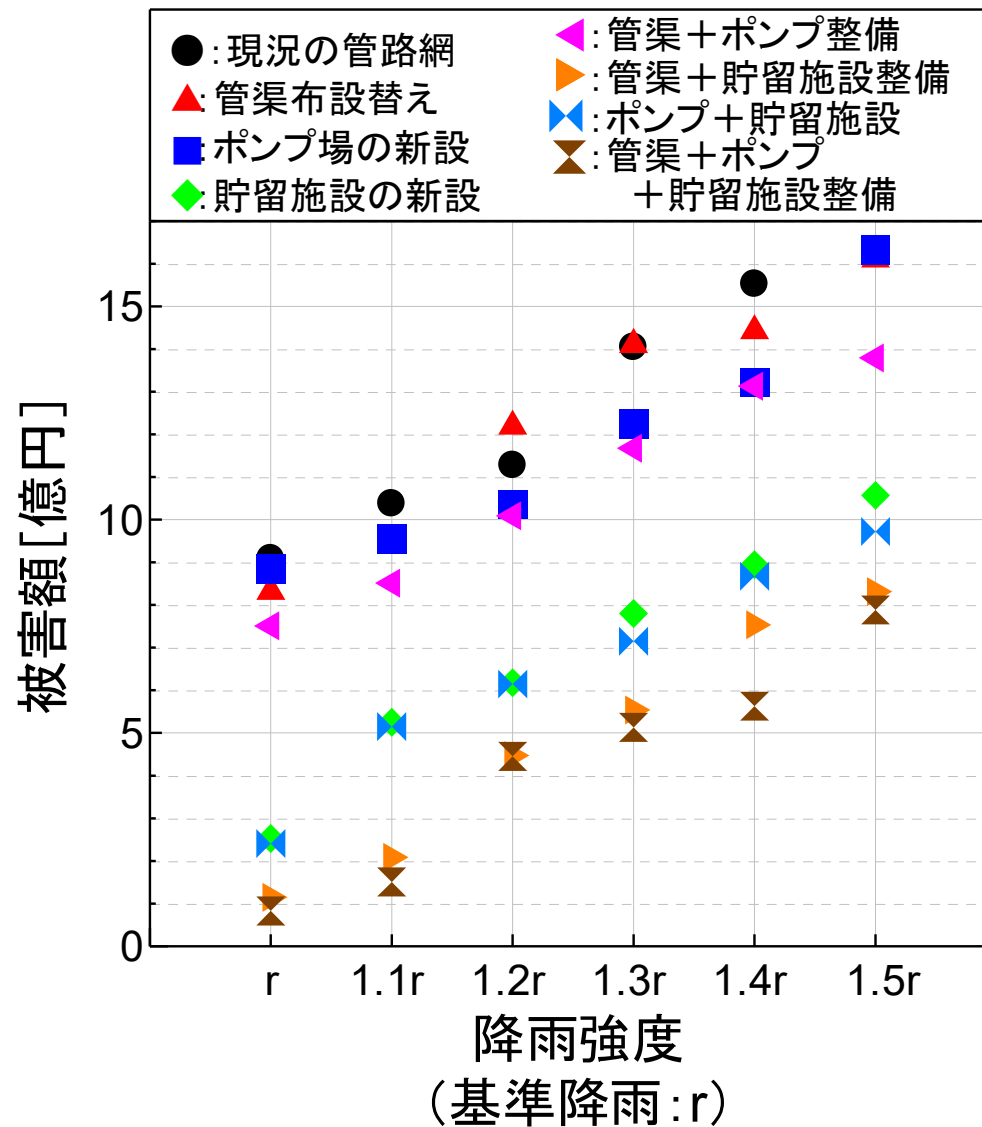
最大湛水深: 0.2[m]
湛水面積: 2,075[m²]

: 管渠整備

: ポンプ場新設

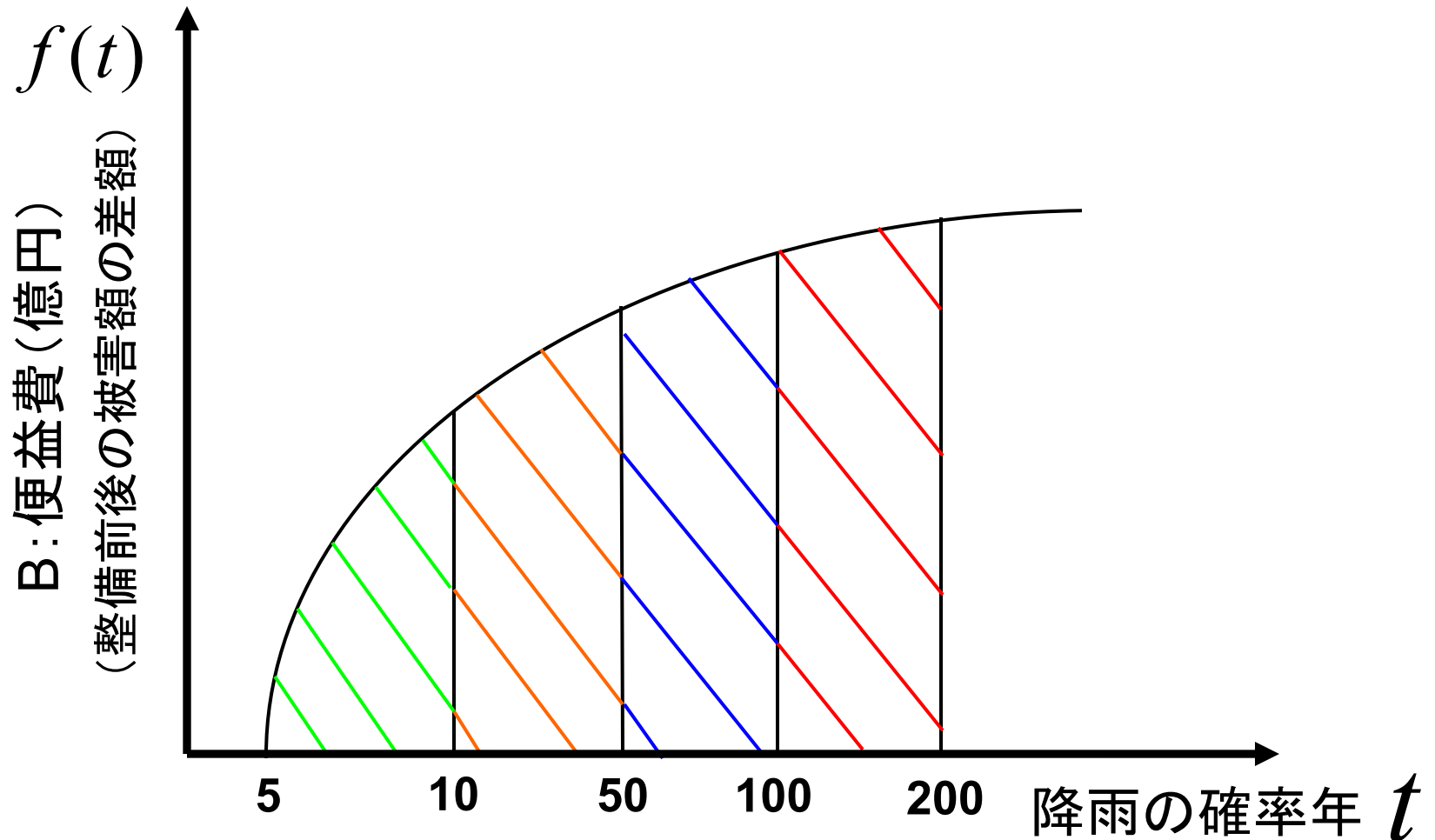
: 貯留施設新設

各種雨水排水対策の被害額



氾濫計算結果より、湛水深のランク別に被害額を算出した。管渠布設替え整備のある降雨パターン以外においては、現況の管路網施設の場合より対策後の被害が軽減している。

年平均被害軽減期待額の算定方法



年平均被害
軽減期待額

$$= \int_{1/10}^{1/5} f(t) dt + \int_{1/50}^{1/10} f(t) dt + \int_{1/100}^{1/50} f(t) dt + \int_{1/200}^{1/100} f(t) dt + \dots$$

費用対効果の算定方法

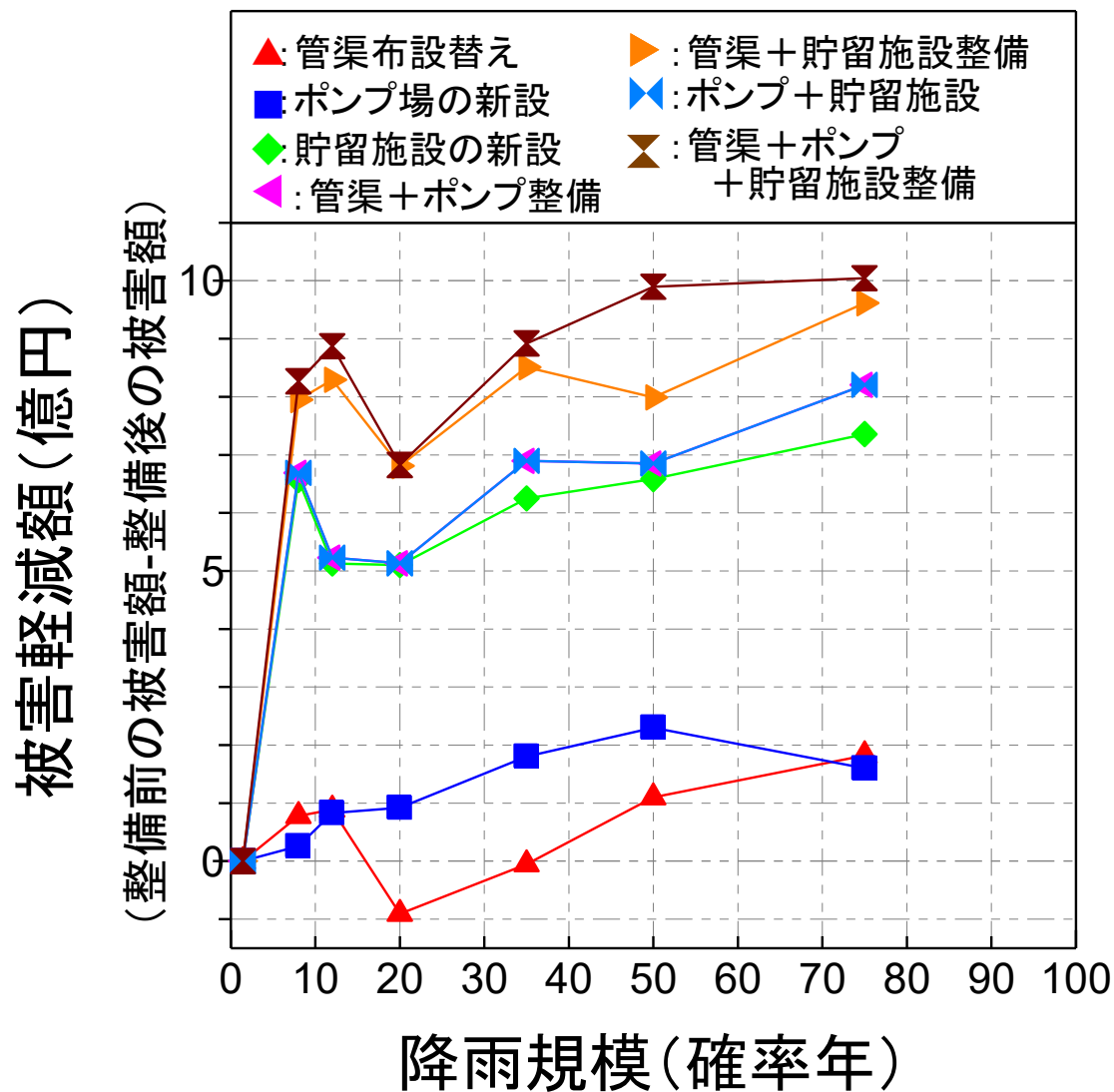
$$\frac{B}{C} = \frac{\text{総便益}}{\text{総費用}}$$

$$= \frac{\{ \Sigma \text{整備前後の被害額の差額} \times \text{降雨の生起確率} \} \times \text{対象期間}}{\text{整備費用} + \text{維持管理費}}$$

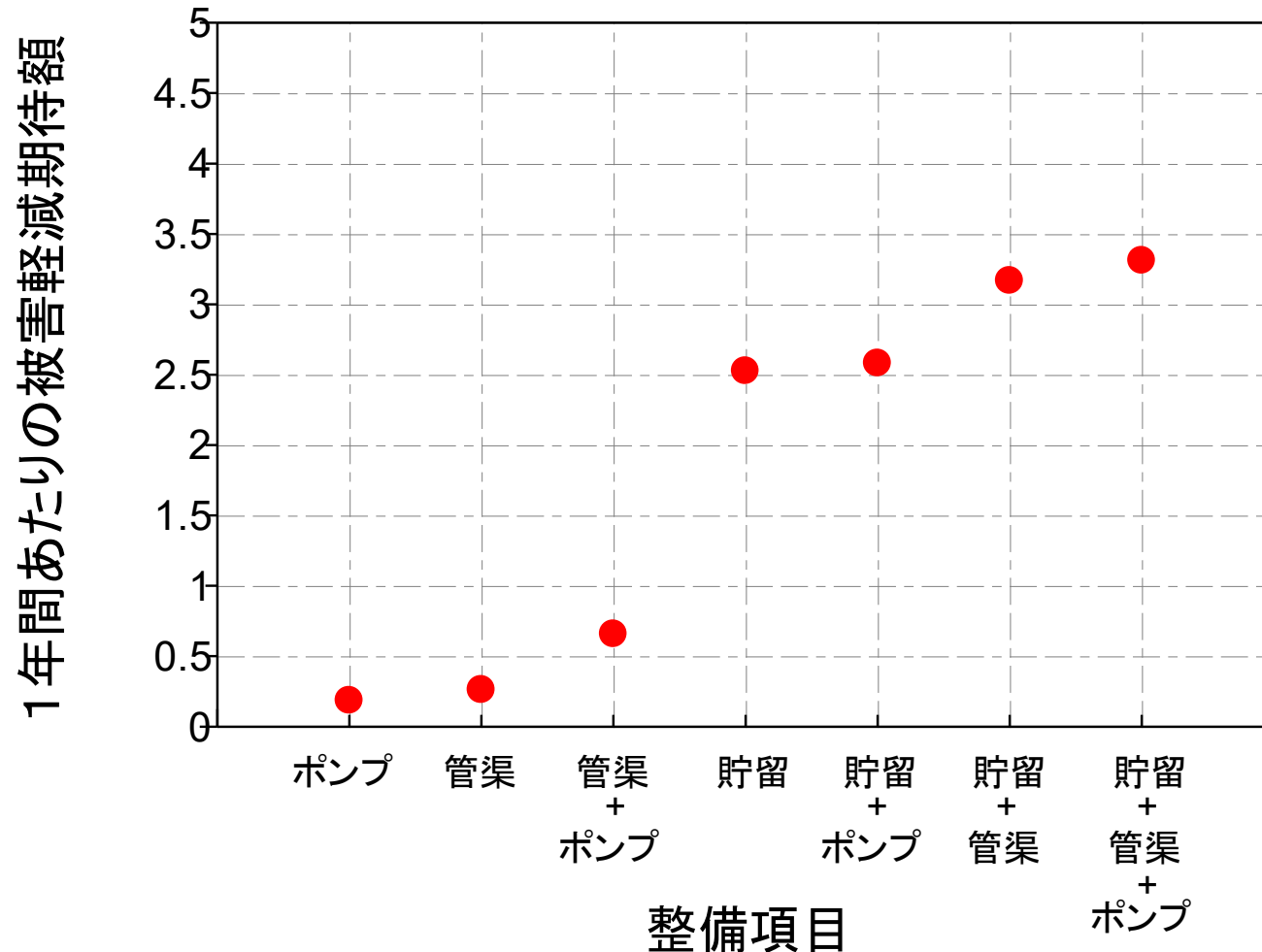
$$= \frac{\text{年平均被害軽減期待額} \times \text{対象期間(年)}}{\text{整備費用} + \text{維持管理費}}$$

- **整備前後における被害軽減額**: 整備前の浸水想定被害額から整備後の浸水想定被害額を差し引いた額
- **整備費用**: 雨水排水施設完成に要する費用
- **維持管理費**: 整備終了から50年間を評価対象期間とし、50年間の維持管理費を現在価値化した費用。年維持管理費は年事業費の0.5%とする。

降雨規模別被害軽減期待額



各種整備対策の1年間あたりの被害軽減期待額



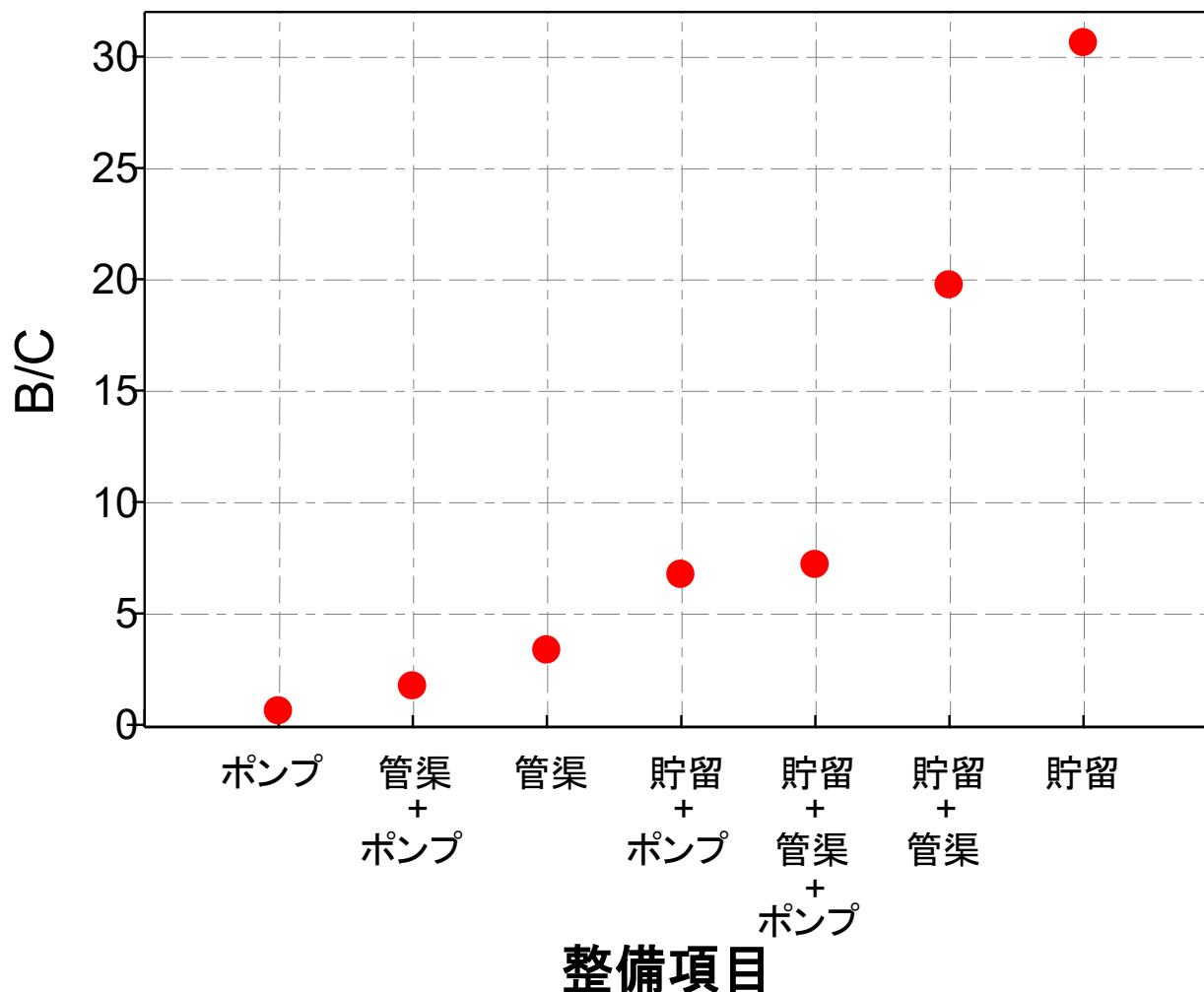
管渠: 管渠布設替え(管渠の管径を一部拡張一直径40cm→80cm)

ポンプ: ポンプ場の新設(排水能力量約2倍に増強)

貯留: 地下貯留施設の新設(貯留面積: 1100[m²] \times 高さ2[m])

各種整備対策の50年間の費用対効果

費用対効果(50年間の費用対効果)

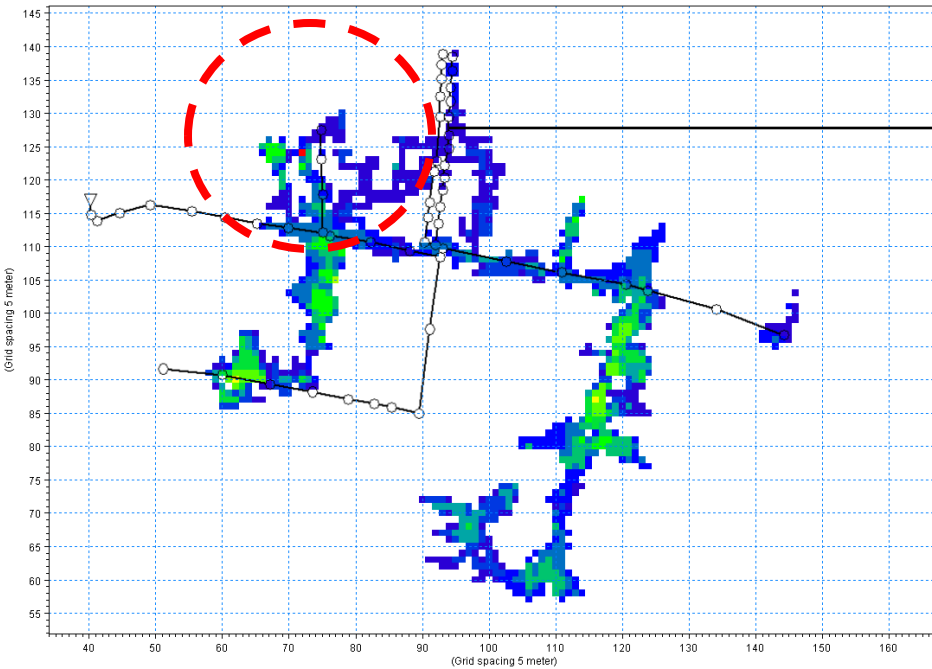


管渠: 管渠布設替え(管渠の管径を一部拡張一直径40cm→80cm)

ポンプ: ポンプ場の新設(排水能力約2倍に増強)

貯留: 地下貯留施設の新設(貯留面積: 1100[m²] \times 高さ2[m])

費用対効果がマイナスの値を示した原因

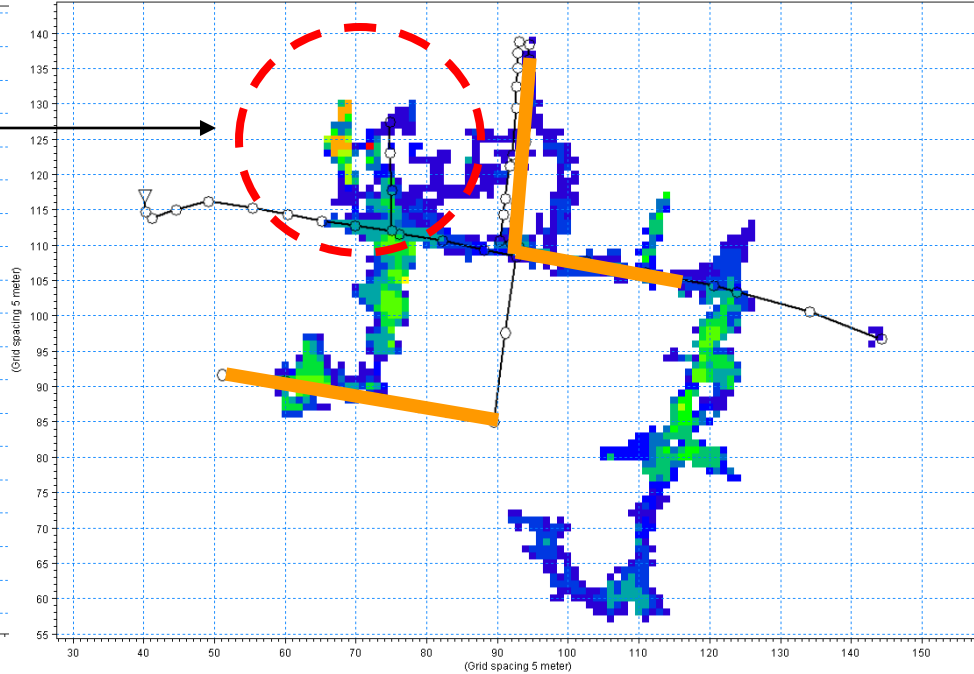
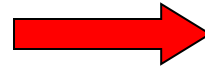


現況の管路網施設

総降雨雨量: 71(mm)

ピーク降雨強度: 25(mm/10min)

(基準降雨の1.2倍)

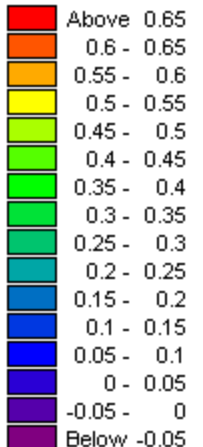


整備後

管渠の管径を一部拡張

管路網の上流の排水能力が増加したことにより下流側で雨水が集まりやすくなり溢れた。

最大浸水深(m)



信頼区間・予測区間を導入した 新しい水文頻度解析手法の提案

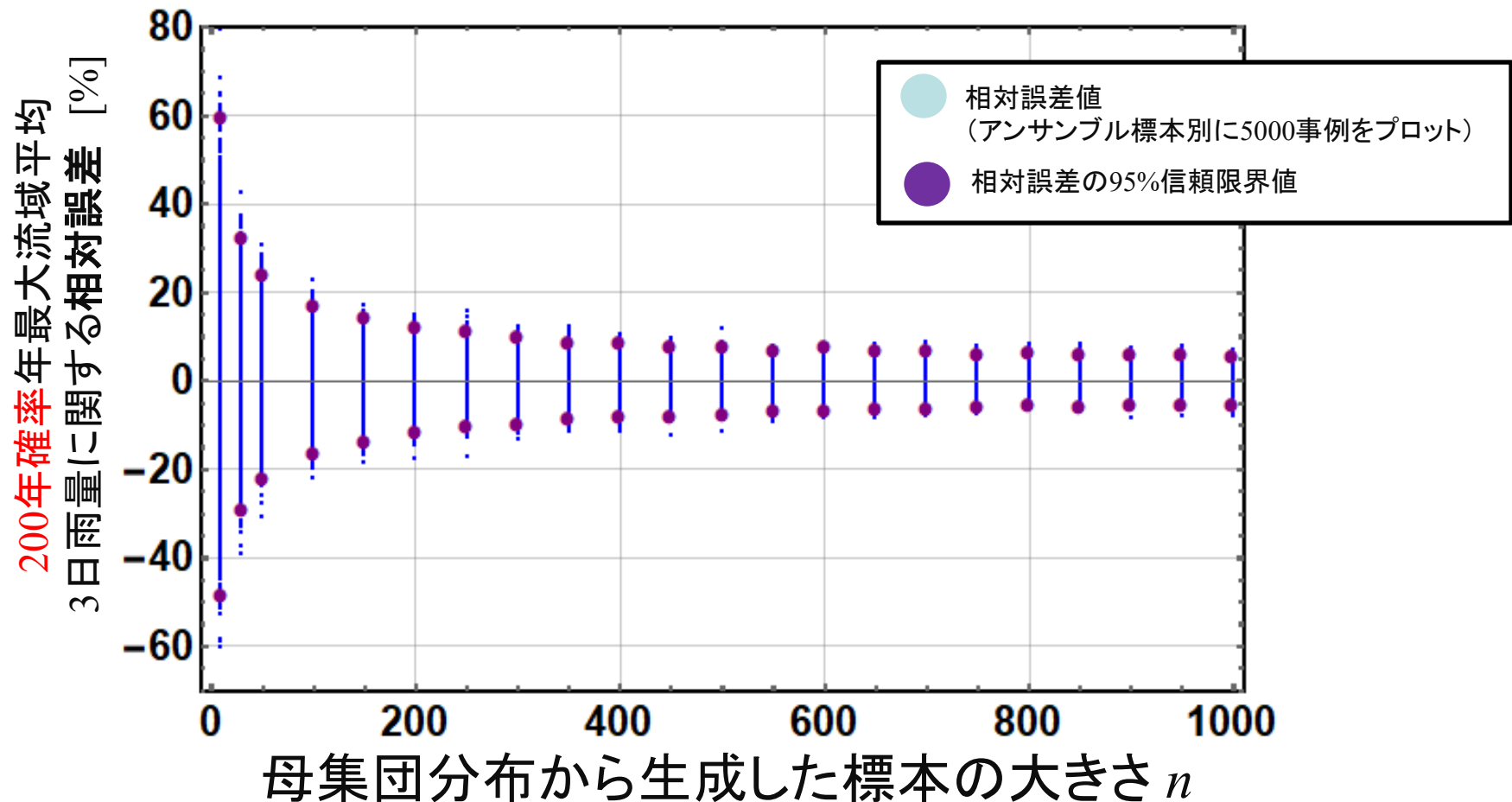
推定精度と標本サイズの関係 (200年確率)

観測値に当てはめたGumbel分布による200年確率年最大流域平均3日雨量(322.0 mm)を真値として扱う。そのGumbel分布から大きさ n の標本を5000個生成。標本の大きさ別に、アンサンブル標本にGumbel分布を当てはめ、200年確率年最大流域平均3日雨量群を算出。下図は、各アンサンブル標本から算定した200年確率年最大流域平均3日雨量による相対誤差と標本の大きさの関係である。

$$\text{相対誤差} = (\text{真値} - \text{計算値}) / \text{真値} \times 100 [\%]$$

真値＝観測値に当てはめたGumbel分布による200年確率年最大流域平均3日雨量

計算値＝モンテカルロ法で作成した標本に当てはめたGumbel分布による200年確率年最大流域平均3日雨量



従来の水文頻度解析の課題

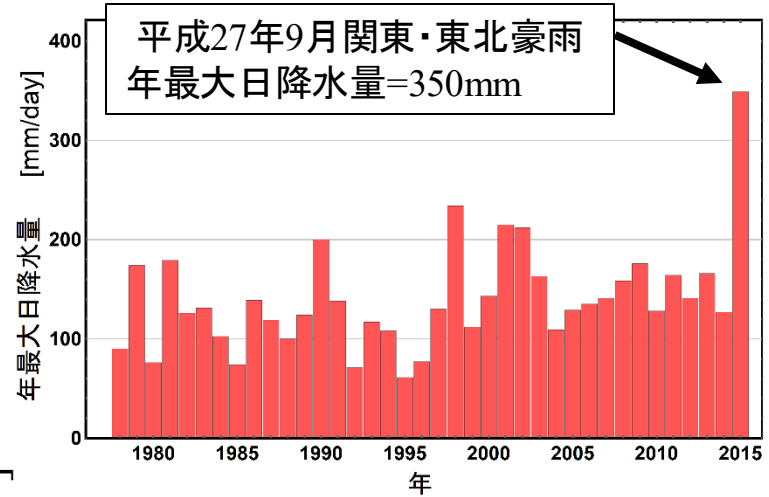
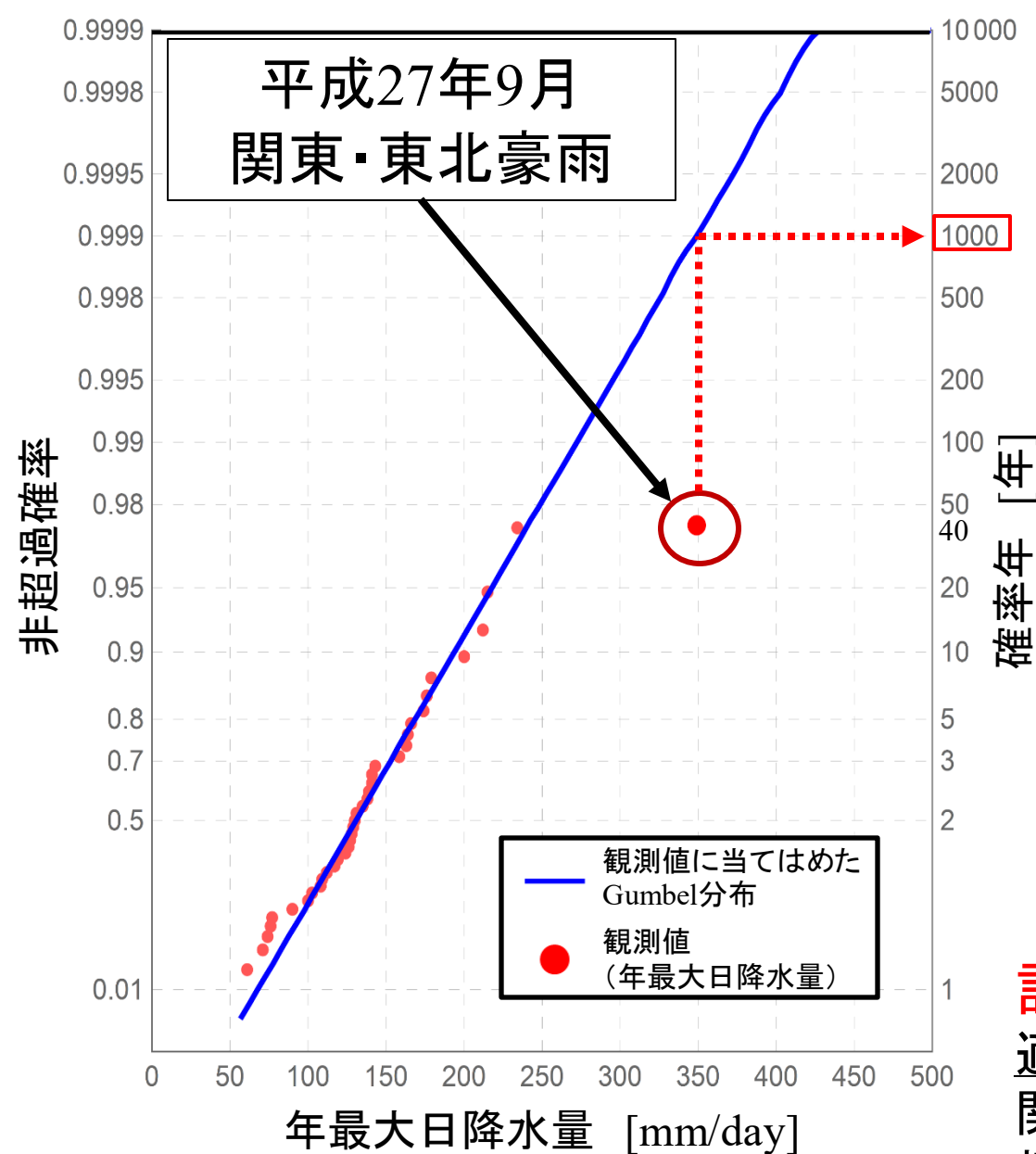


図 利根川水系五十里観測所における1957年から2015年に渡る38年間分の年最大日降水量の観測値時系列

従来の水文頻度解析では、
**記録的豪雨の確率年は、
数千年～数万年となる
場合が多い。**



計画確率年による評価が困難
適合度重視の従来手法の下では、
関東・東北豪雨は、“想定外”として
扱われる。

従来の水文頻度解析の課題

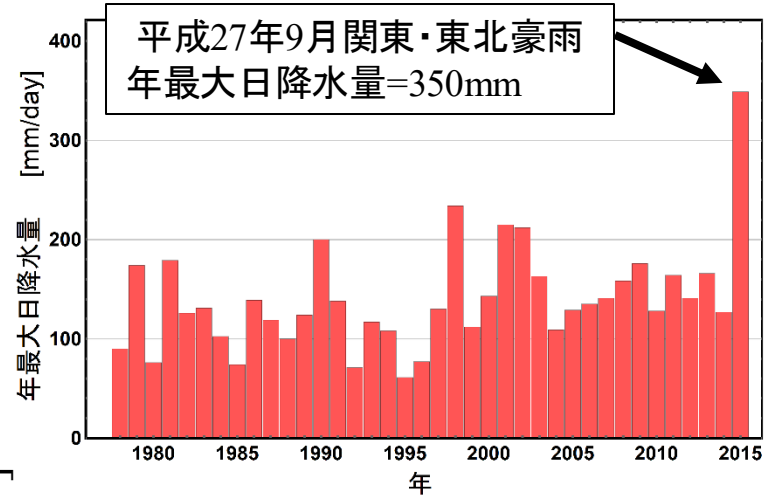
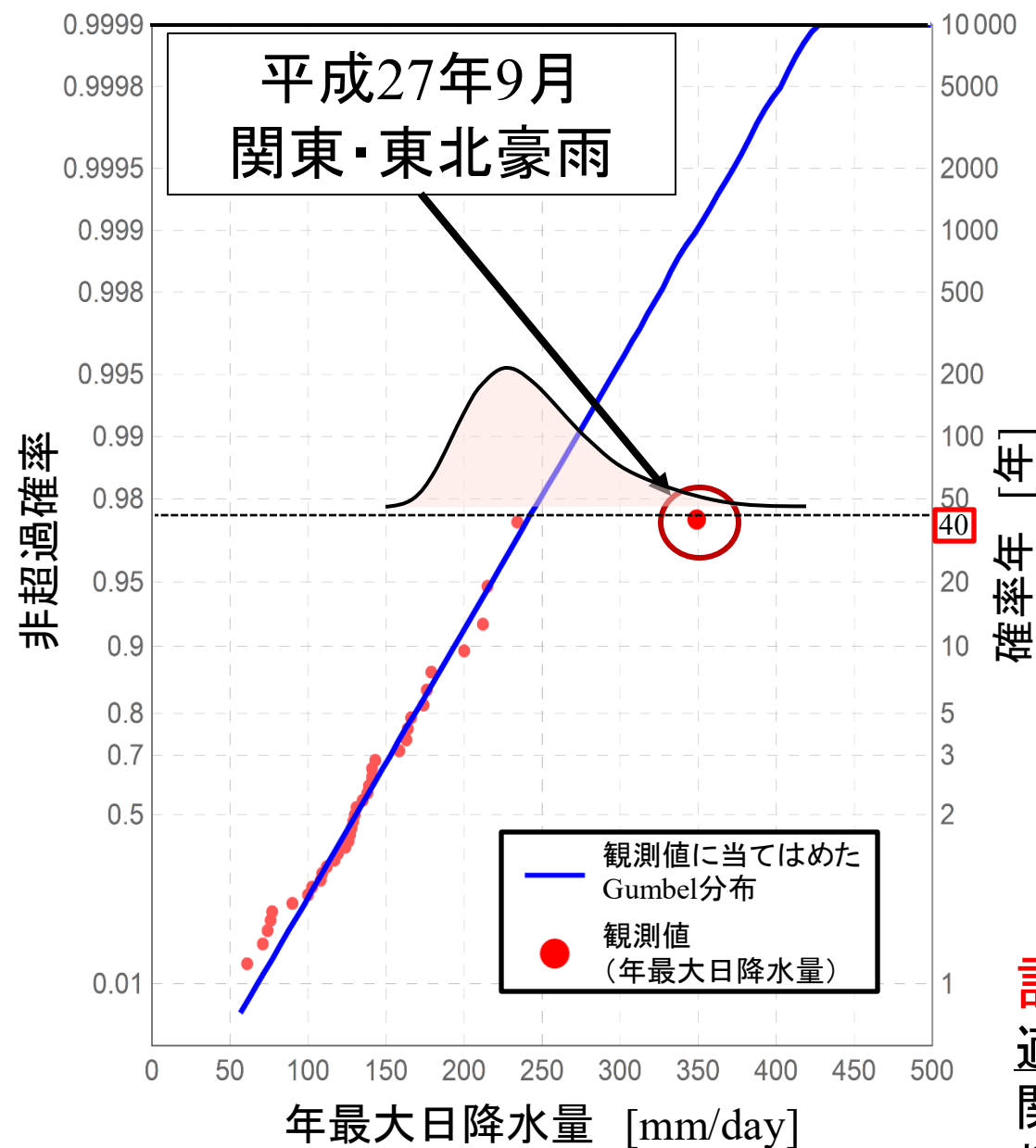
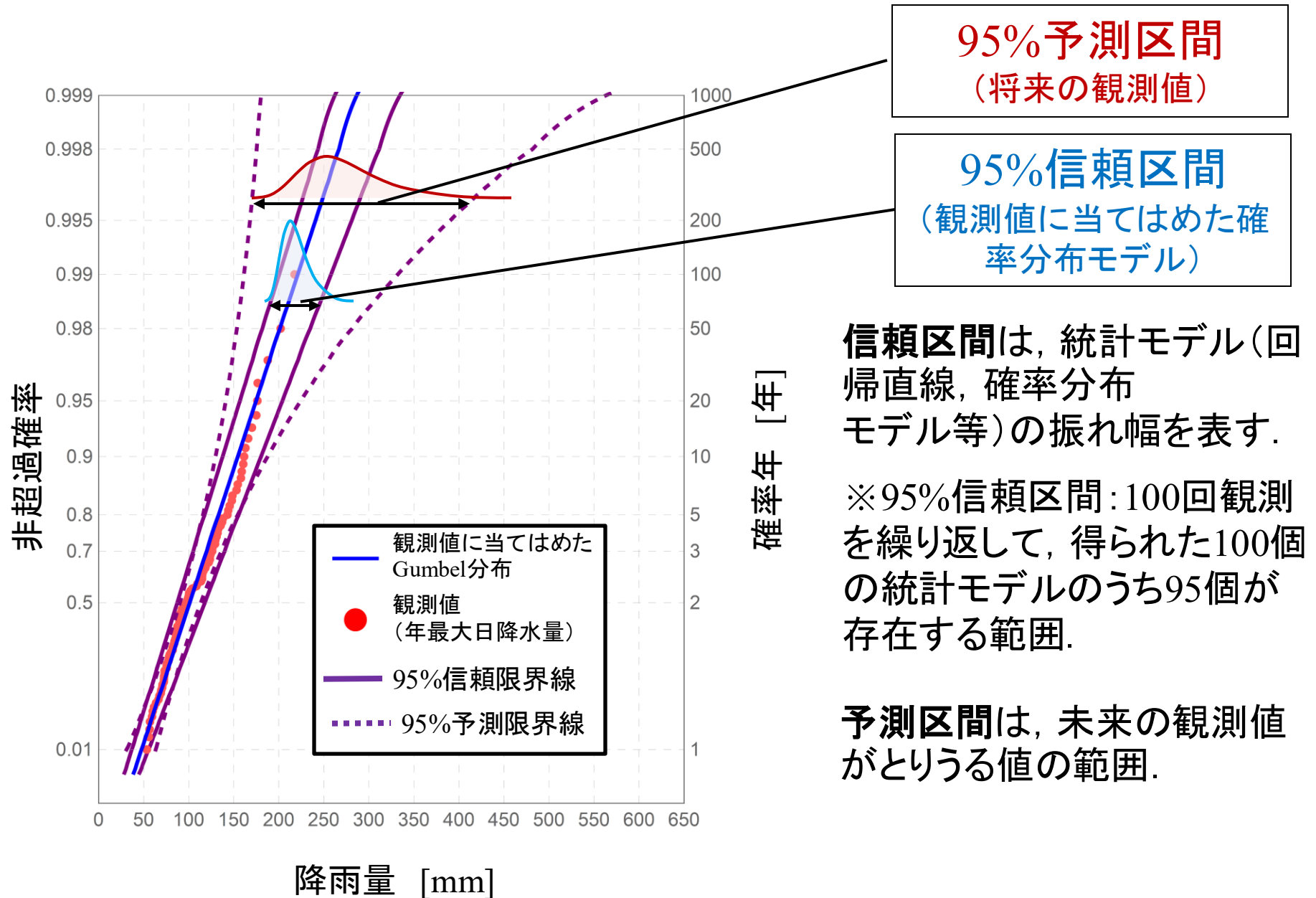


図 利根川水系五十里観測所における1957年から2015年に渡る38年間分の年最大日降水量の観測値時系列

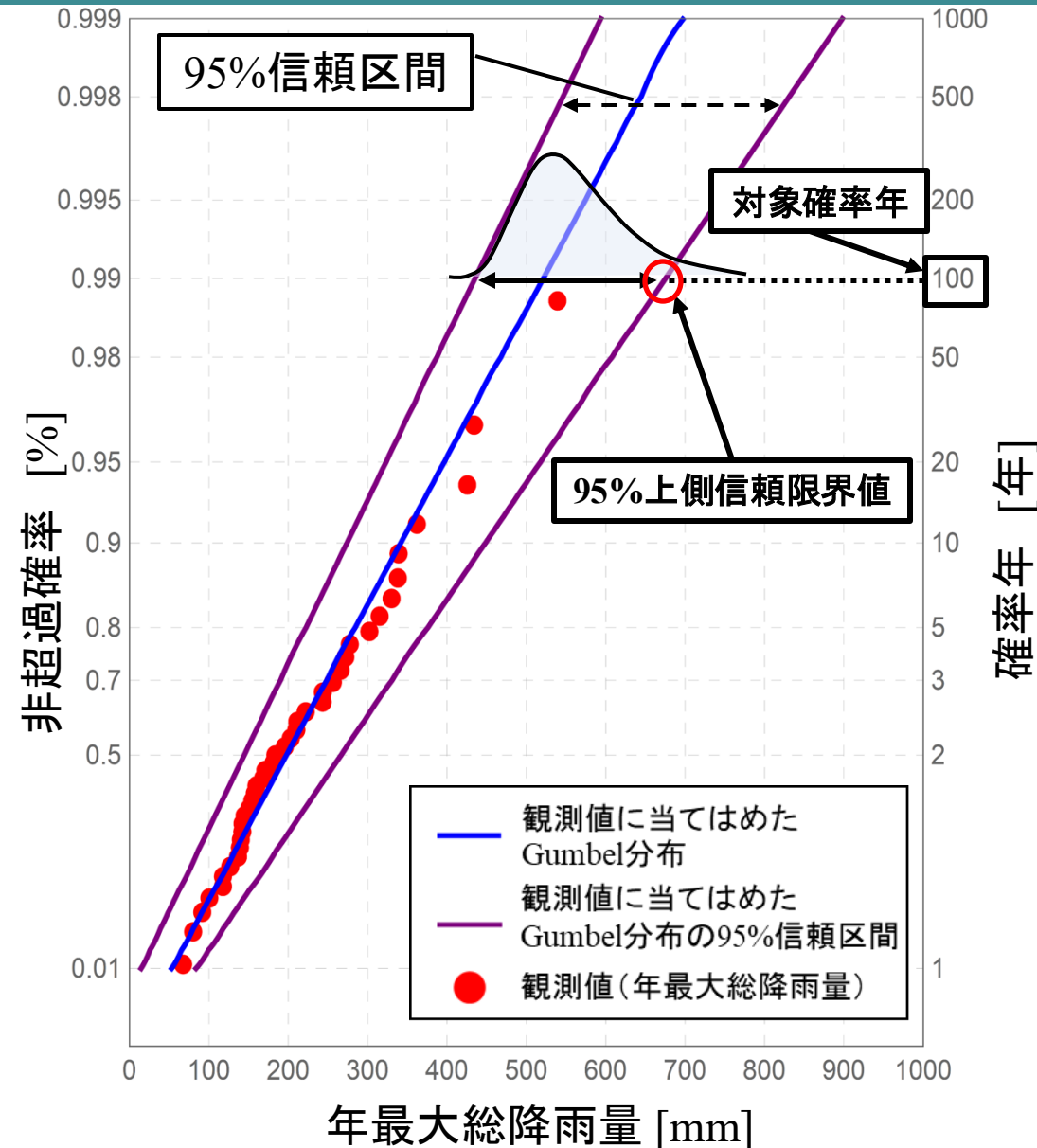
従来の水文頻度解析では、
**記録的豪雨の確率年は、
数千年～数万年となる
場合が多い。**

計画確率年による評価が困難
適合度重視の従来手法の下では、
関東・東北豪雨は、“想定外”として
扱われる。

信頼区間と予測区間の概要



確率限界法検定に基づく信頼区間の水文頻度解析への導入



確率紙には、草木ダム流域における41年間分の年最大総降雨量の観測値およびこれら41個の観測値を当てはめたGumbel分布、確率限界法検定により導出した当該Gumbel分布の95%信頼区間を記入した。

T 年確率規模相当の上側信頼限界値がもつ超過確率は、「対象確率年」と「信頼区間の超過確率」との積により求まる。

100年確率水文量の95%上側信頼限界値の超過確率

$$\frac{1}{100} \times 2.5\%$$

対象確率年

片側確率(95%信頼区間)

$$= 2.5 \times 10^{-4} \text{ (1/4千)}$$

信頼区間の導入により、従来では考慮されなかった規模の豪雨が生起するリスクを算出することができる。

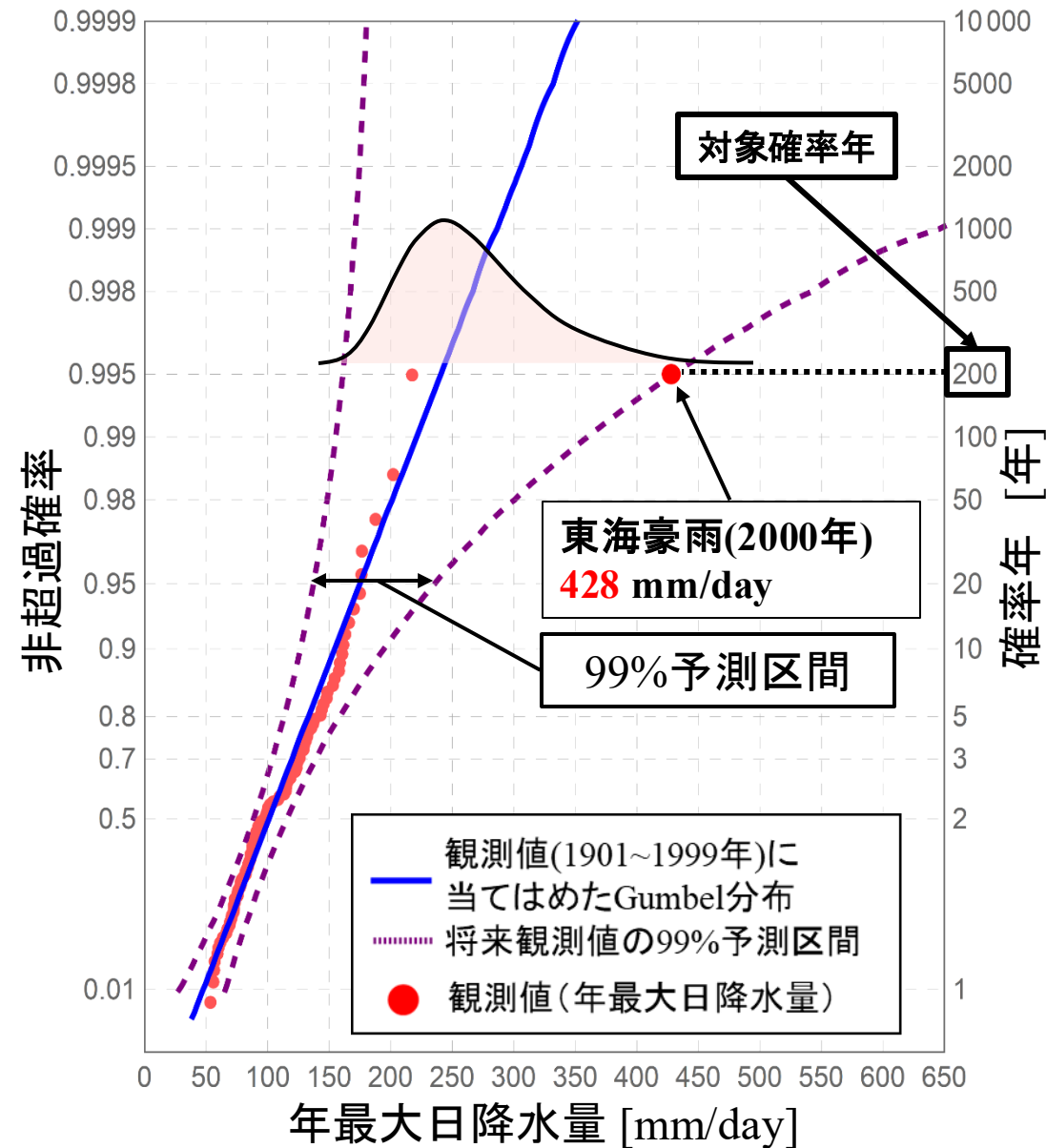


他のリスクとの相対評価が可能となる

【参考】交通事故による年間死亡リスク：約1/4万※ [人]

※出典：警察庁資料

確率限界法検定に基づく予測区間の水文頻度解析への導入



T 年確率規模相当の上側予測限界値がもつ超過確率は、「対象確率年」と「予測区間の片側確率」との積により求まる.

200年確率水文量の99%上側予測限界値の超過確率

$$\frac{1}{200} \times 0.5\%$$

対象確率年

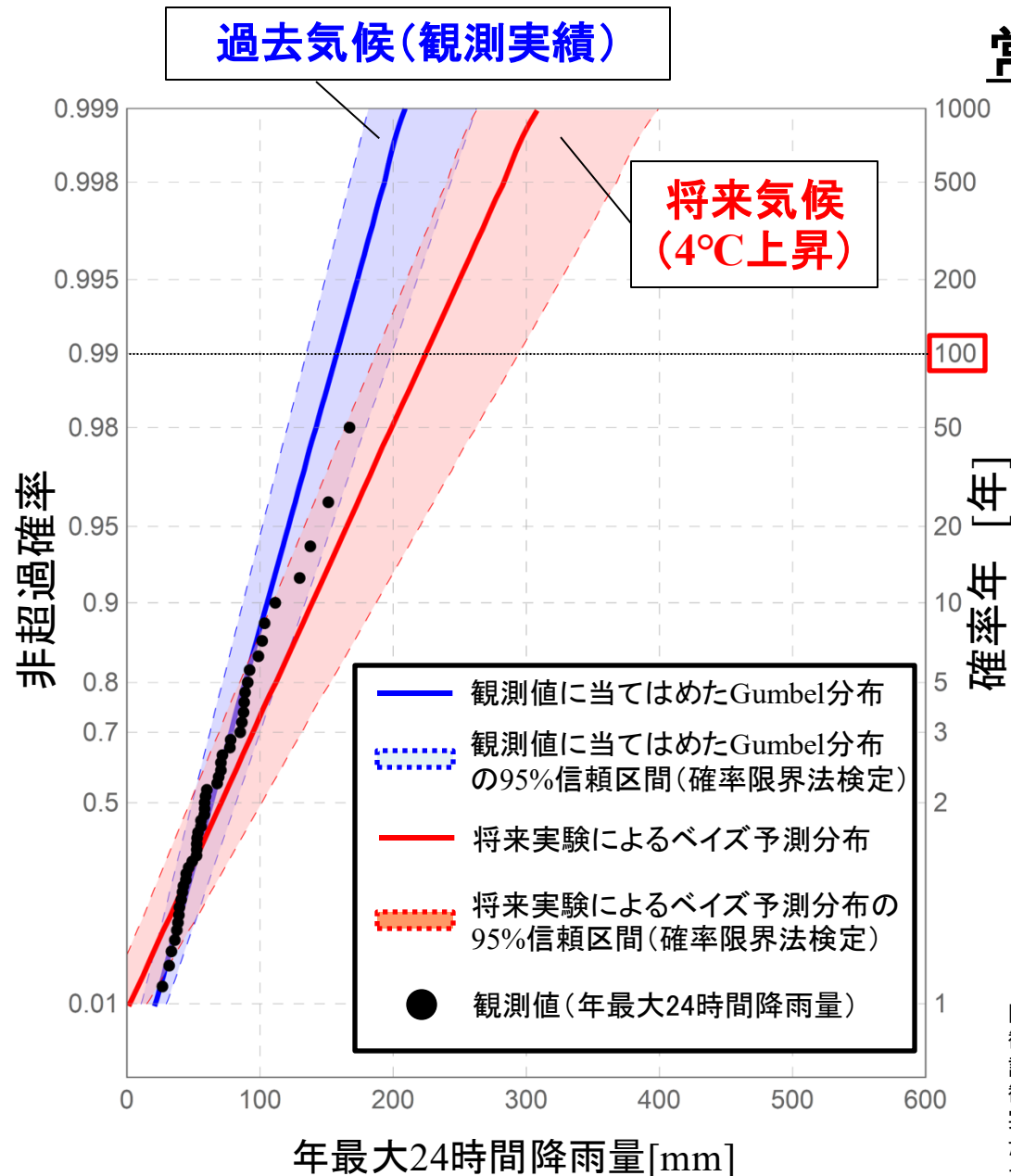
片側確率(99%予測区間)

$$= 2.5 \times 10^{-5} \text{ (1/4万)}$$

予測区間の導入により, 将来期間における激甚豪雨の規模およびその生起リスクが算出可能となる.

ベイズ理論に基づく信頼区間の将来変化

常呂川北見基準地点



有限なデータに基づき推定された計画降雨量値の不確実性が信頼区間という形で定量化され、その将来変化の推定が可能となった。

100年確率年最大24時間降雨量の95%信頼区間の将来変化

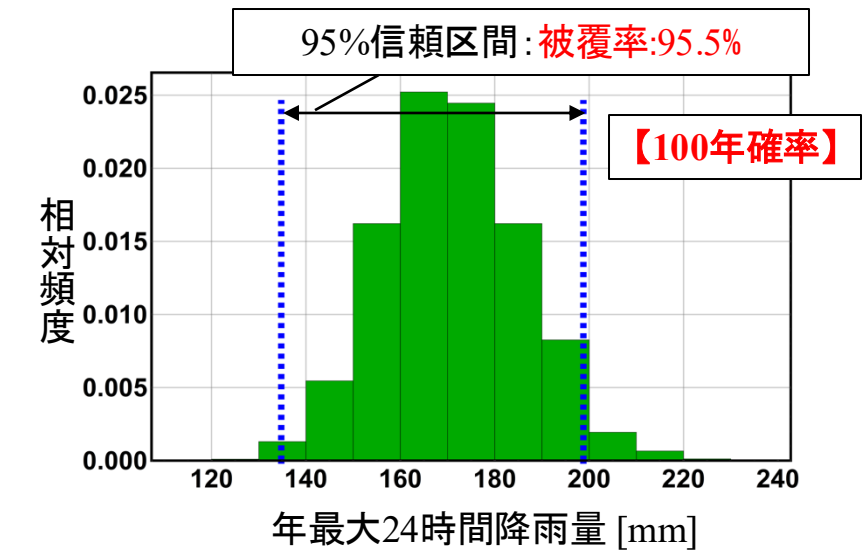
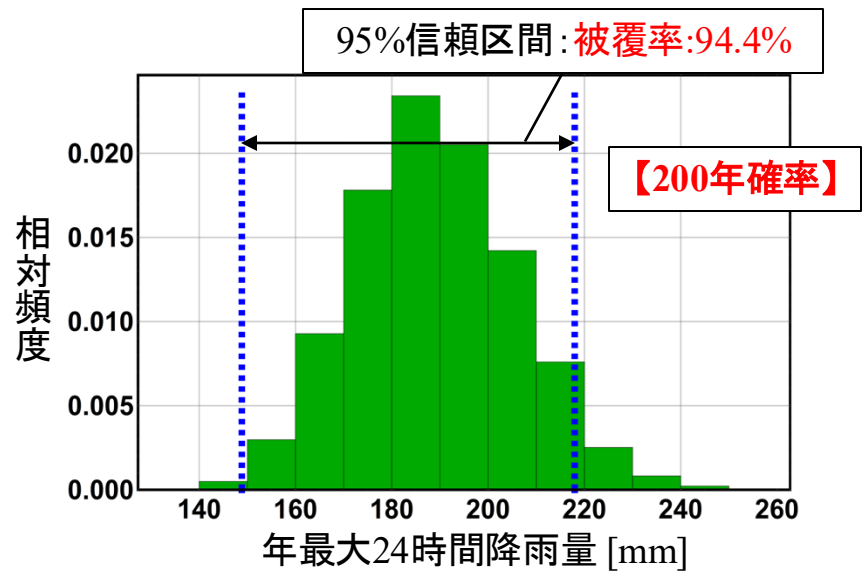
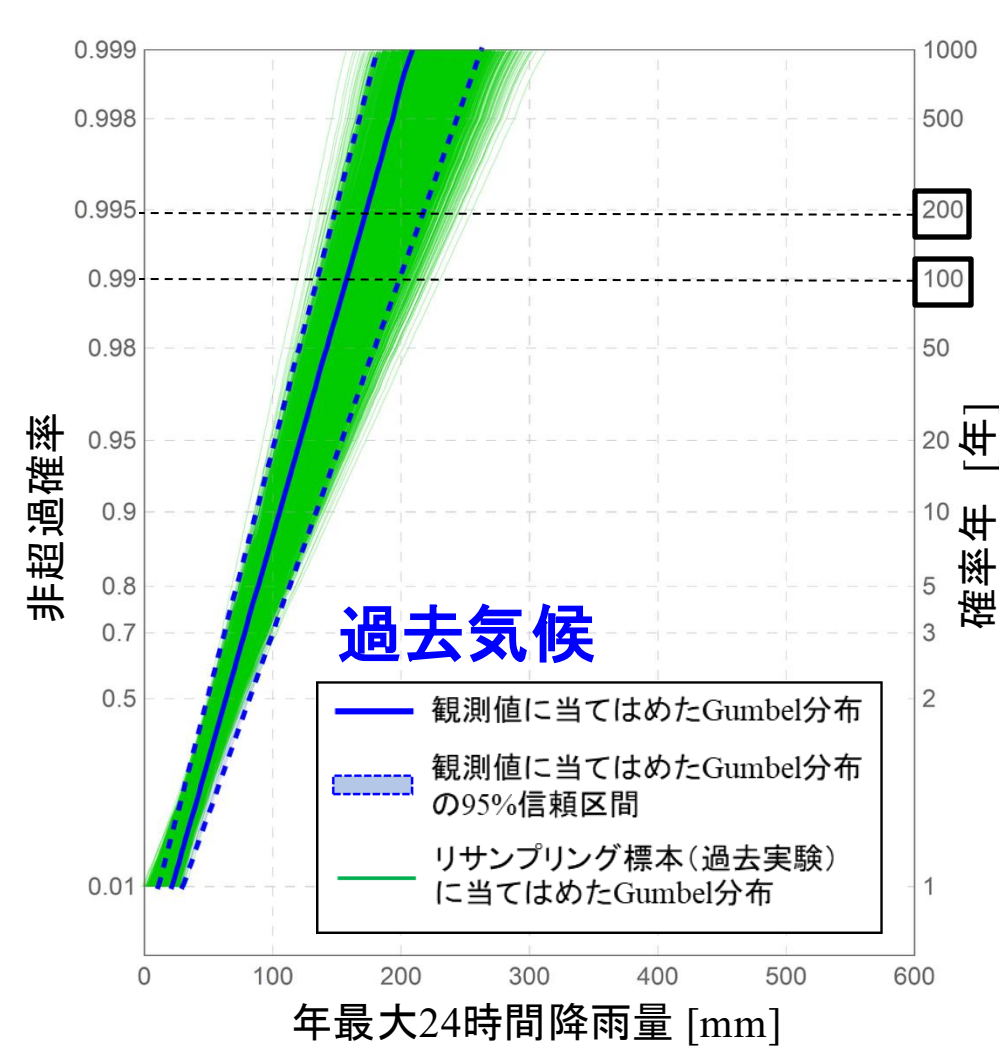
観測実績: 157.7mm
将来気候: 224.6mm

95%上側信頼限界値(観測実績): 198.8mm
95%上側信頼限界値(将来気候): 294.4mm

図 常呂川北見地点流域における24時間降雨量の観測値(黒点)、これらの観測値に当てはめたGumbel分布(青実線)および確率限界法検定に基づく当該Gumbel分布の95%信頼区間(青色で表示された範囲)とMCMC法に基づき観測値に当てはめたGumbel分布に力学的ダウンスケーリング適用後の将来実験結果を取り入れベイズ更新されたGumbel分布(解析用データに当てはめたGumbel分布の予測分布、赤実線)、確率限界法検定に基づくベイズ更新された当該Gumbel分布の95%信頼区間(赤色で表示された範囲)

d4PDF(5km, 過去実験)へのリサンプリングの適用による信頼区間の評価

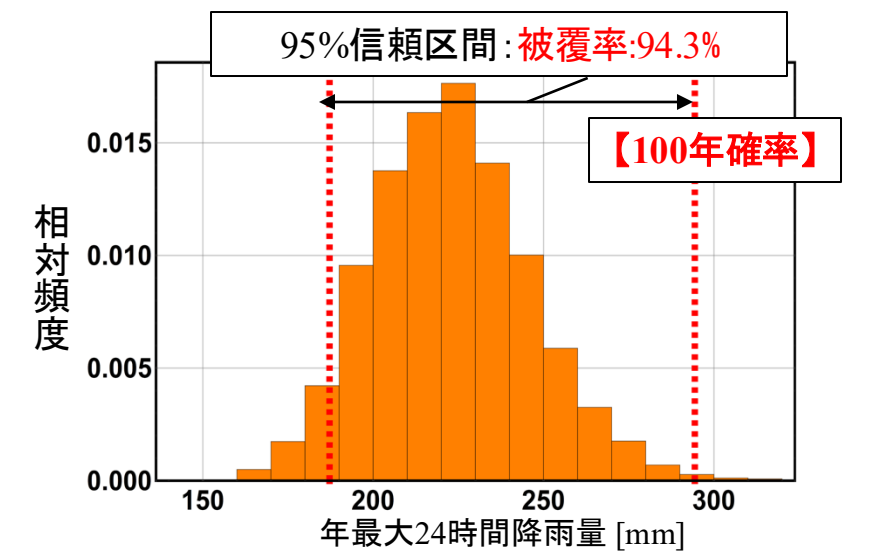
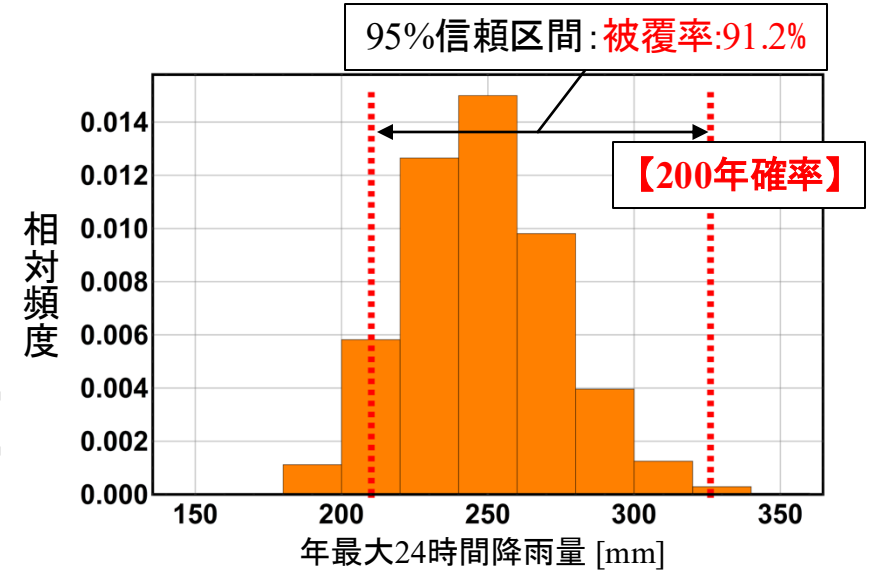
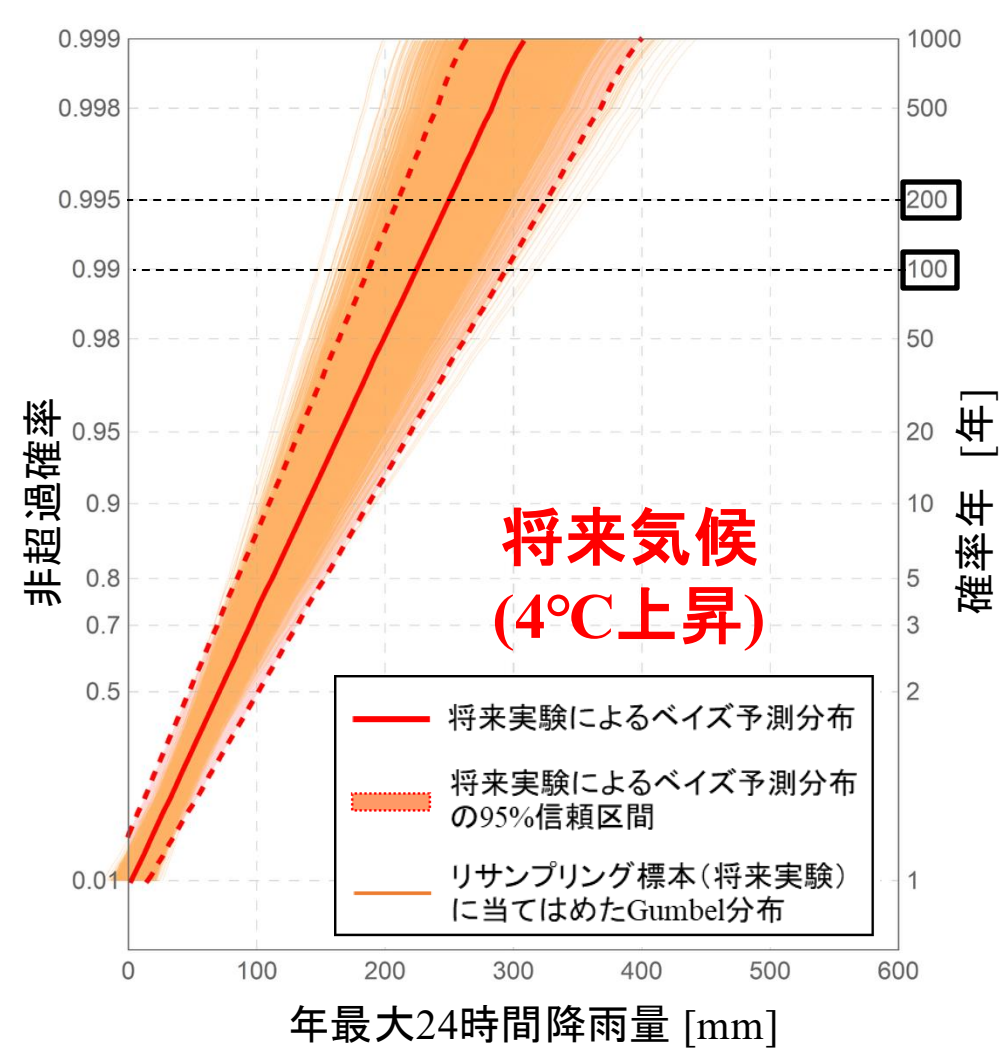
確率限界法検定に基づく信頼区間の精度を評価するために、過去実験結果へのリサンプリングの実施により得られる確率雨量の度数分布が信頼区間に含まれる割合(=被覆率)を算出する。



確率限界法検定に基づく信頼区間は、
物理的モンテカルロ法による確率雨量の頻度分布に高い精度で適合している。

d4PDF(5km, 将来実験)へのリサンプリングの適用による信頼区間の評価

確率限界法検定に基づく信頼区間の精度を評価するために、将来実験結果へのリサンプリングの実施により得られる確率雨量の度数分布が信頼区間に含まれる割合(=被覆率)を算出する。



確率限界法検定に基づく信頼区間は、
物理的モンテカルロ法による確率雨量の頻度分布に高い精度で適合している。

ベイズ理論に基づく予測区間の将来変化

過去気候(観測実績)

常呂川北見基準地点

予測区間の更新により、地球温暖化進行時における極値降雨量の規模ならびにその生起リスクが評価可能となる。

100年確率年最大24時間降雨量の95%予測区間の将来変化

観測実績: 157.7mm

将来気候: 224.6mm

95%上側予測限界値(観測実績):
280.7mm

95%上側予測限界値(将来気候):
437.9mm

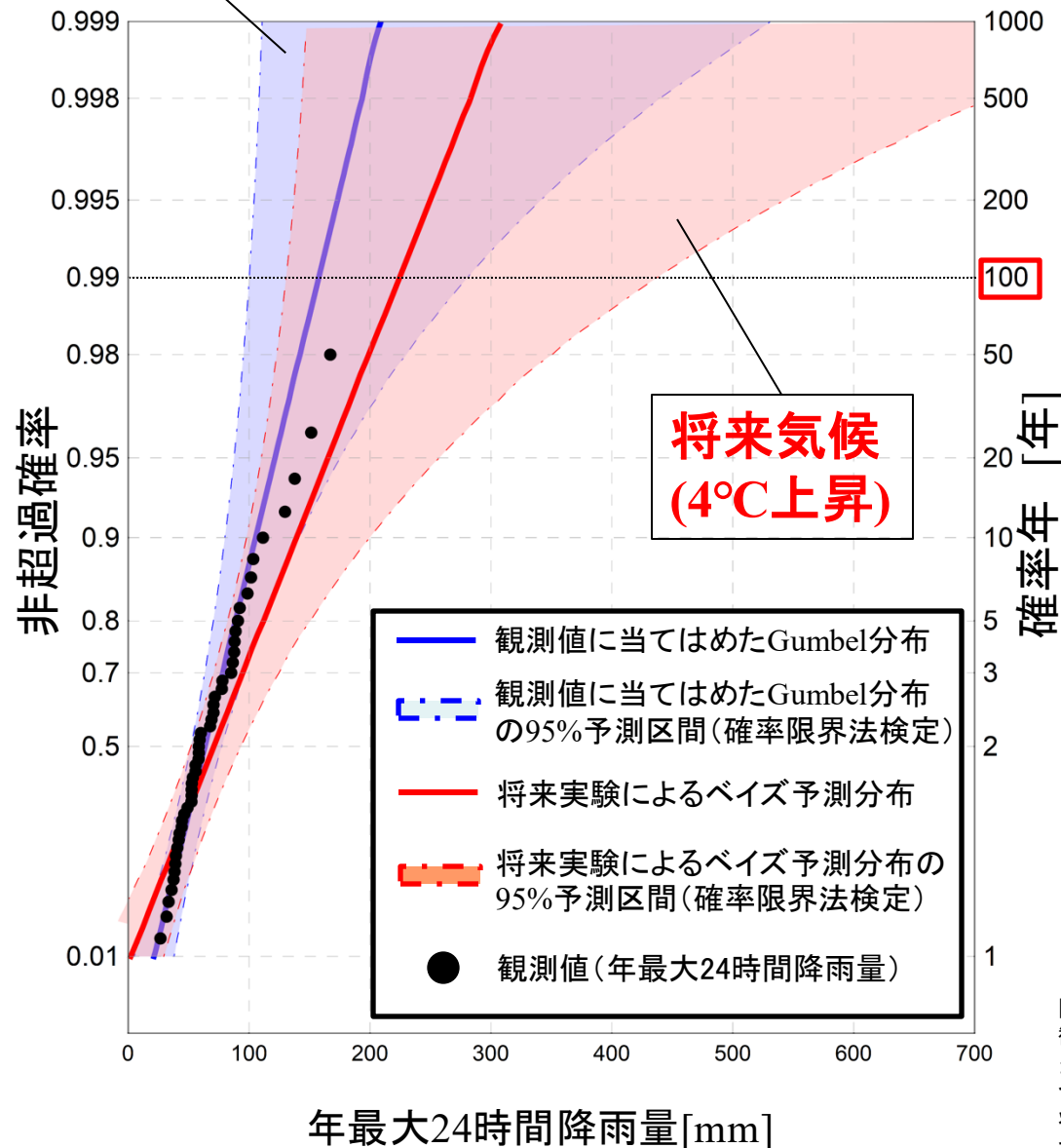


図 常呂川北見地点流域における24時間降雨量の観測値(黒点)、これらの観測値に当てはめたGumbel分布(青実線)および確率限界法検定に基づく当該Gumbel分布の95%予測区間(青色で表示された範囲)とMCMC法に基づき観測値に当てはめたGumbel分布に力学的ダウンスケーリング適用後の将来実験結果を取り入れベイズ更新されたGumbel分布(解析用データに当てはめたGumbel分布の予測分布、赤実線)、確率限界法検定に基づくベイズ更新された当該Gumbel分布の95%予測区間(赤色で表示された範囲)

**河川整備における最低便益の
最適化のための基本的な考え方
—B/Cから最適停止問題としてのB-Cへ—**

研究背景

■治水行政の適応的改善の中には幾多の段階的な進捗の歴史が存在する

1962年:「水害区域資産調査要綱」および
「水害区域資産調査実施要領」の策定

1970年:上記要綱および要領を取りまとめた「治水経済調査要綱」の策定

1998年:「社会資本整備に係る費用対効果分析に関する統一的運用指針(案)」の策定

2005年:「治水経済調査要綱」が有する問題点の整理から
見直された現在の社会経済情勢に適合した
一般資産評価、家屋等の一般資産被害率、
事業実施のスケジュールを考慮した費用便益分析を
基本とする「治水経済調査マニュアル(案)」の策定

以降、都度改定を行っている

治水経済調査マニュアル(案)

令和6年4月

国土交通省 水管理・国土保全局

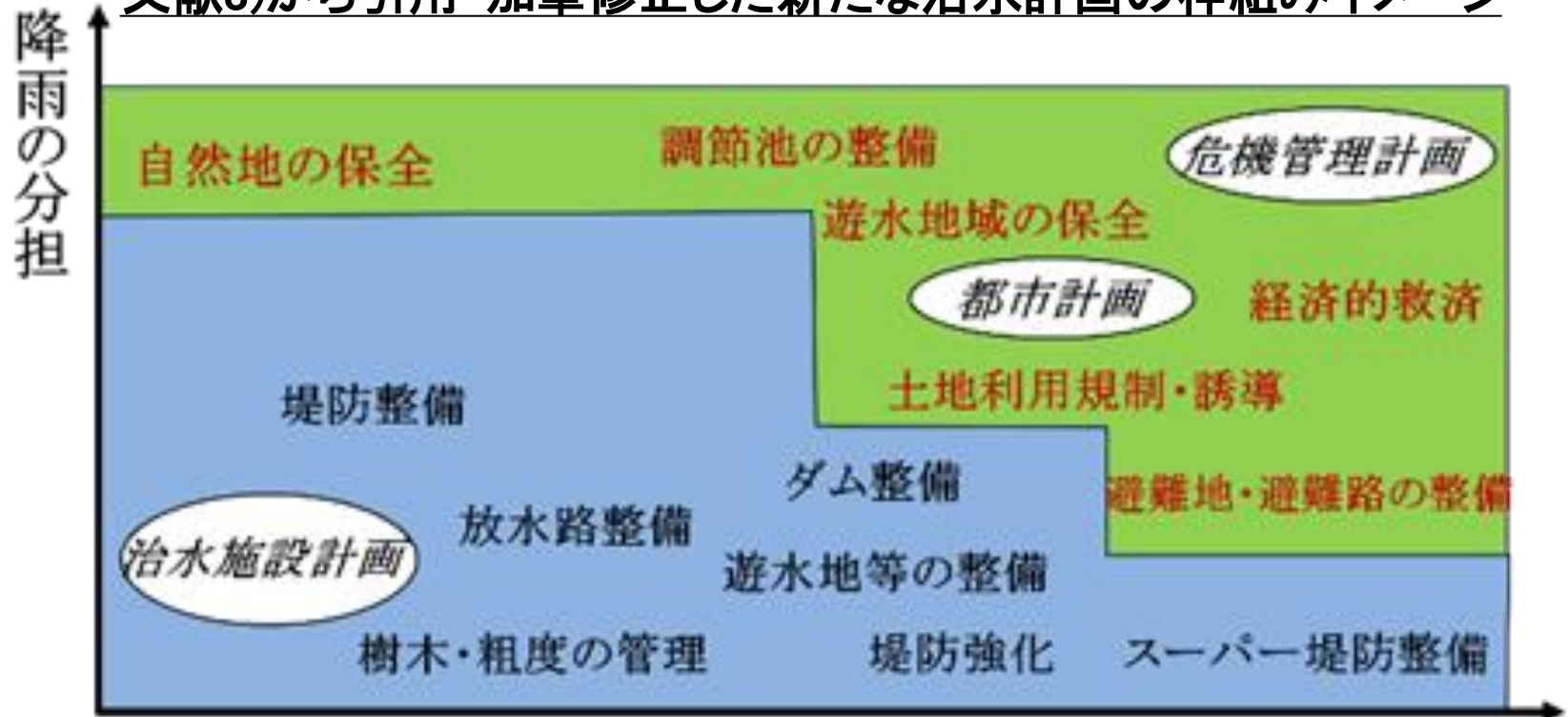
研究背景

以降、治水経済調査マニュアルに沿った河川整備に関する学術研究^{例えば1)2)}が見出されたが、B/CやB-Cの公共経済学的な意味づけを数学的に解析する研究はほぼ無い



これに対し、著者の山田正は気候変化を前提とし、不確実性への対処を含めた新たな治水計画のあり方・枠組みと必要な技術の検討を行った。

文献3)から引用・加筆修正した新たな治水計画の枠組みイメージ



【出典・引用】

1)柴崎隆一、家田仁：計画治水安全度の決定における洪水リスク特性の計測，河川技術論文集，第9巻，pp.305-310，2003.

2)湧川勝己：治水経済調査の概要と今後の方向について，河川技術に関する論文集，第6巻，pp.215-220，2000.

3)山田ら：気候変化を踏まえた治水計画の在り方に関する研究，河川技術論文集，第17巻，pp.437-442，2011

降雨の規模

政策判断としての費用便益分析

ある政策（施策、事業）を実施した（する）場合における費用便益分析の選択基準として、従来は以下の3つが用いられてきた¹⁾²⁾

(1)社会的純便益(B-C)を最大化する基準

もしくは

純便益の社会的割引率 r を考慮した現在価値 (Net Present Value) の最大値を与える外力を採択する基準

(2)費用・便益比(B/C)の最大値を与える外力を採択する基準

(3)内部収益率基準：長峯¹⁾によると、(2)と本質的に同じ

上記の費用・便益分析法の基盤のもとに「治水経済調査マニュアル(案)」に見られる河川整備の基本的考え方や計算方法を敷衍化し、新たな費用便益分析の基本的考え方と計算法を提案する

【出典・引用】

1)長峯純一：費用対効果 Basic公共政策学11巻，ミネルヴァ書房，2014.

2)野口悠紀雄：公共経済学，日本評論社，1982.

設計外力 R に対する B , C ,そして B/C および $B-C$ の数学的特性

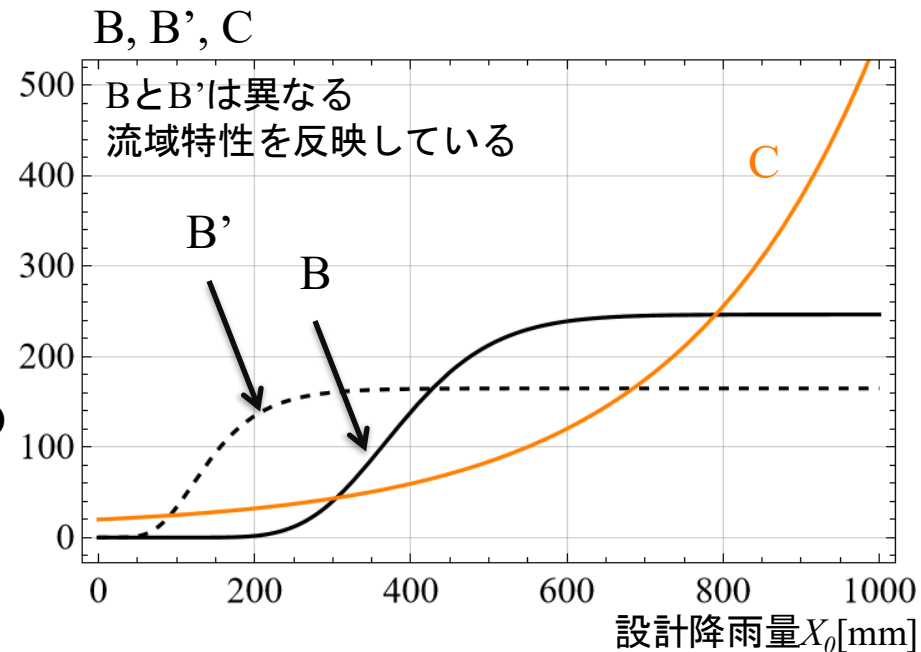
一般的な河川整備の立案の流れ

1. 当該河川流域の人口や資産の集積度などの河川の重要度に応じて年超過確率を設定し、対応するように降雨時系列を引き伸ばす
2. その降雨時系列を用いて流出解析を実施し基準地点における計画流量を決定
3. 計画流量を安全に流すための、
河川整備水準に直結する諸施設(堤防、遊水地、放水路、ダムなど)の建設に伴う費用 C
↓比較判断
その事業実施によって回避される洪水の被害額(最低便益) B

ここで、設計外力としての豪雨のレベルを $X_0[\text{mm}]$ とする

便益 $B(X_0)$ と費用 $C(X_0)$ は、 X_0 に関して増加関数であることが経験的に知られている

左図は設計外力 X_0 に対する費用 C と便益 B の一般系であり、 B と B' は流域特性を表す



設計外力Rに対するB, C,そしてB/CおよびB-Cの数学的特性

ここで、設計外力 X_0 に対する
費用便益比B/Cおよび純便益B-Cは

$$Y_1(X_0) = B(X_0)/C(X_0), \quad Y_2(X_0) = B(X_0) - C(X_0)$$

であり、以下のように式変形ができる

$$Y_2(X_0) = C(X_0) \left\{ \frac{B(X_0)}{C(X_0)} - 1 \right\} = C(X_0) \{ Y_1(X_0) - 1 \}$$

これを X_0 に関して微分すると、

$$\frac{dY_2}{dX_0} = \frac{dC}{dX_0} (Y_1(X_0) - 1) + C(X_0) \frac{dY_1}{dX_0}$$

$Y_1(X_0) = B(X_0)/C(X_0) > 1$ の区間において

$Y_1(X_0) - 1 > 0$ であり、 $C(X_0)$ が増加関数であるため、
 $\frac{dY_2}{dX_0}$ が極値をもつ $X_{02\max}$ では $\left. \frac{dY_1}{dX_0} \right|_{X_{02\max}} < 0$ となる

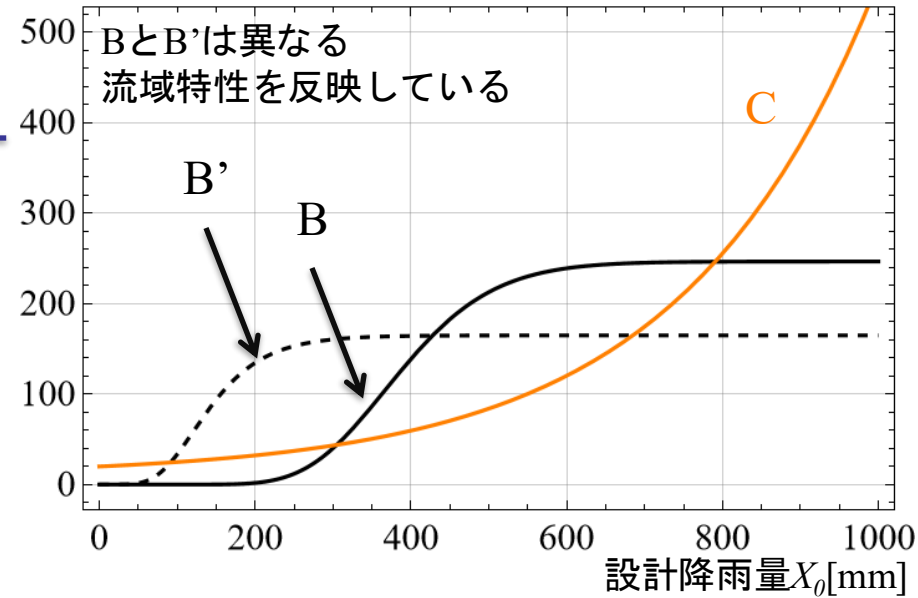
よって必ず、 $X_{01\max} < X_{02\max}$ ($X'_{01\max} < X'_{02\max}$)となる
以上より、

(1)費用便益比B/Cの極値を与える $X_{01\max}$ を採用するか

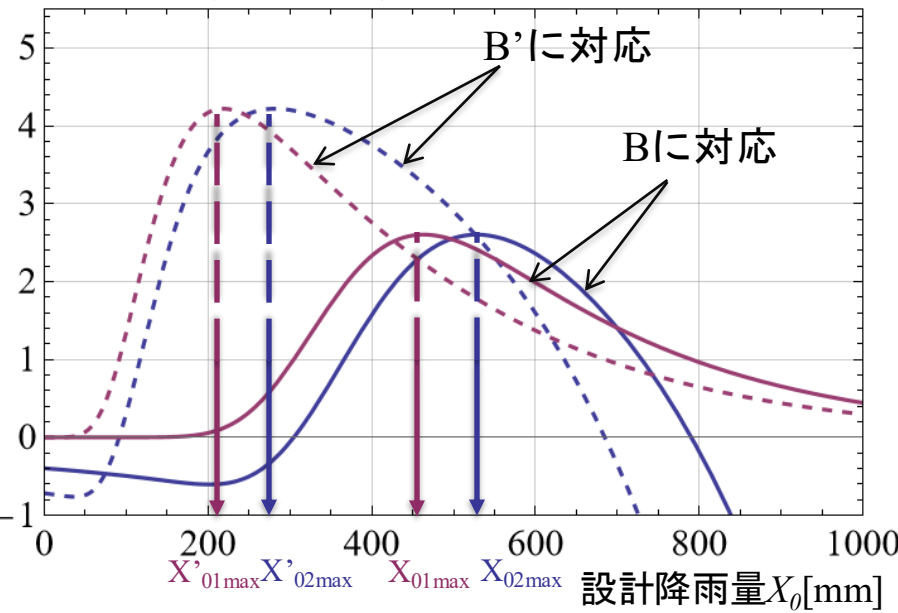
(2)純便益B-Cの極値を与える $X_{02\max}$ を採用するか

という二者選択の問題でかつこのXで決めるか＝最適停止問題となり、「最適の指標」の最適値を選ぶ問題として捉えることができる

B, B', C



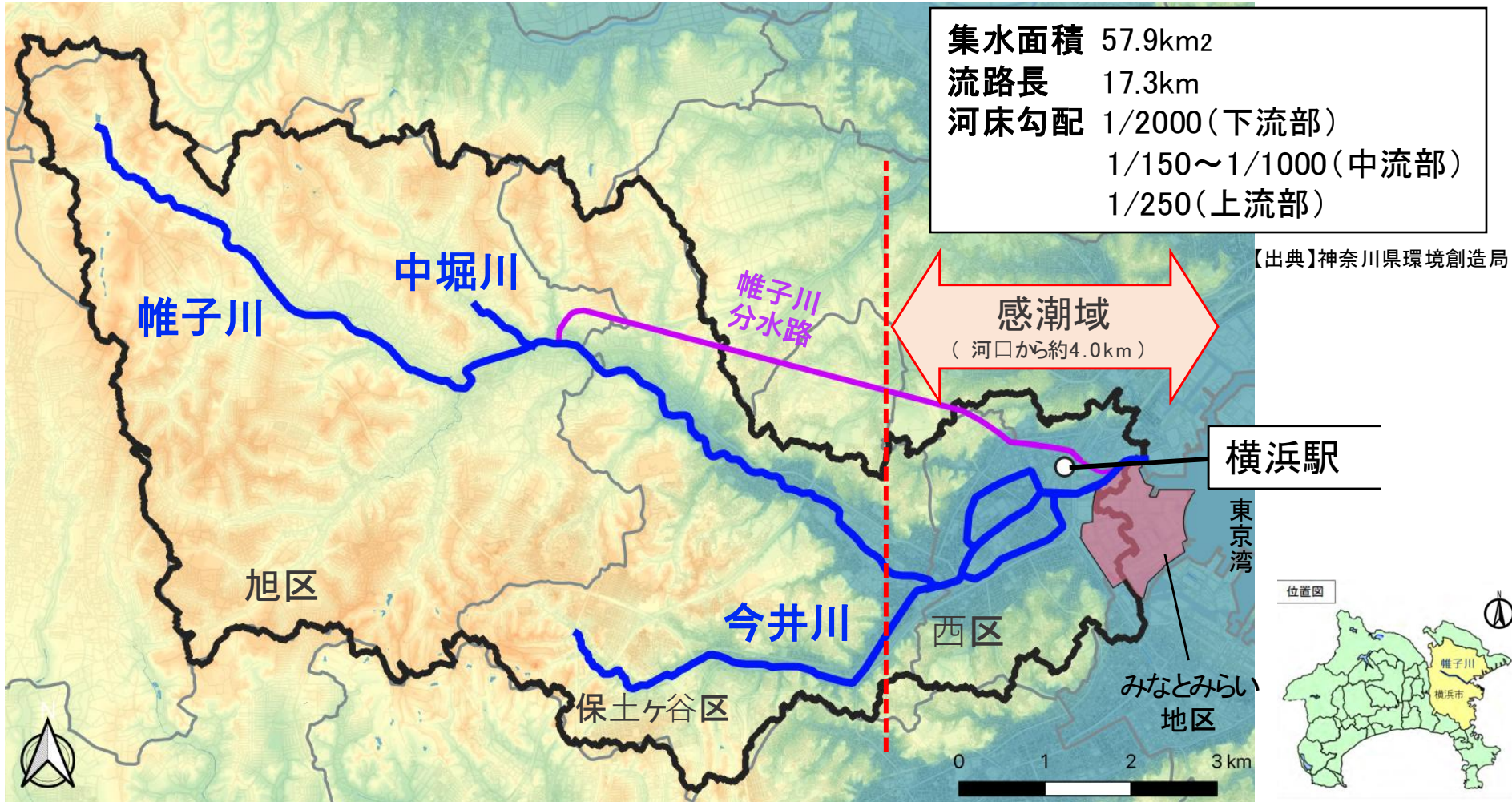
B/C, B-C(B'/C, B'-C)



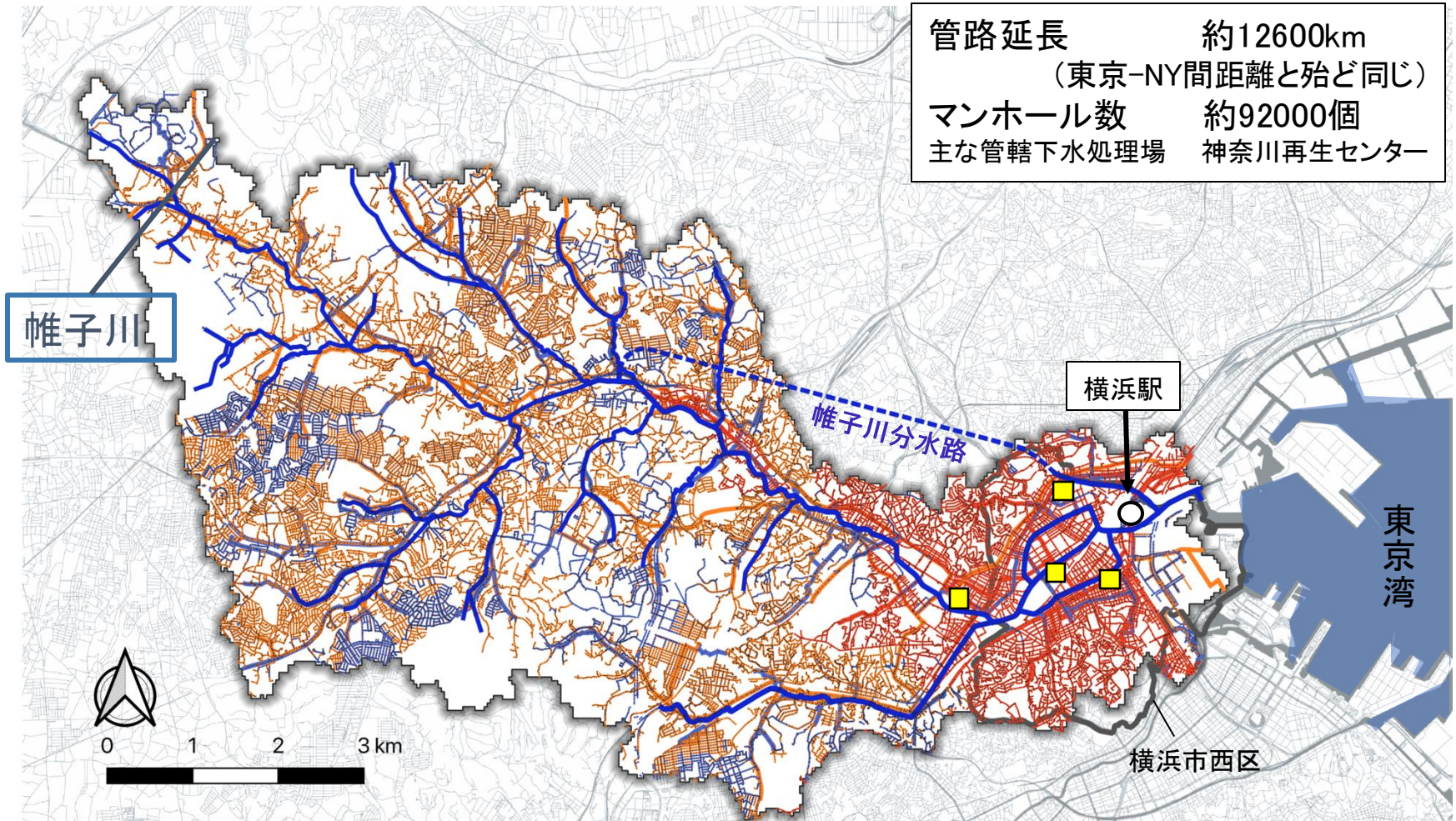
都市域の感潮河川における河川整備の重要性

帷子川(かたびらがわ)

神奈川県横浜市に位置する二級河川。横浜市旭区若葉台付近に源を発し、途中で支川を合流し、下流部では石崎川、新田間川等を分合流して横浜港へ注ぐ。**帷子川下流域、帷子川放水路開水路区間、石崎川全川、新田間川全川において潮位の影響を受ける**。名の由来は、一方が山に囲まれ、他方に田や野原を控えていたため「片平」と言ったのではないかとの説がある。



帷子川(かたびらがわ)



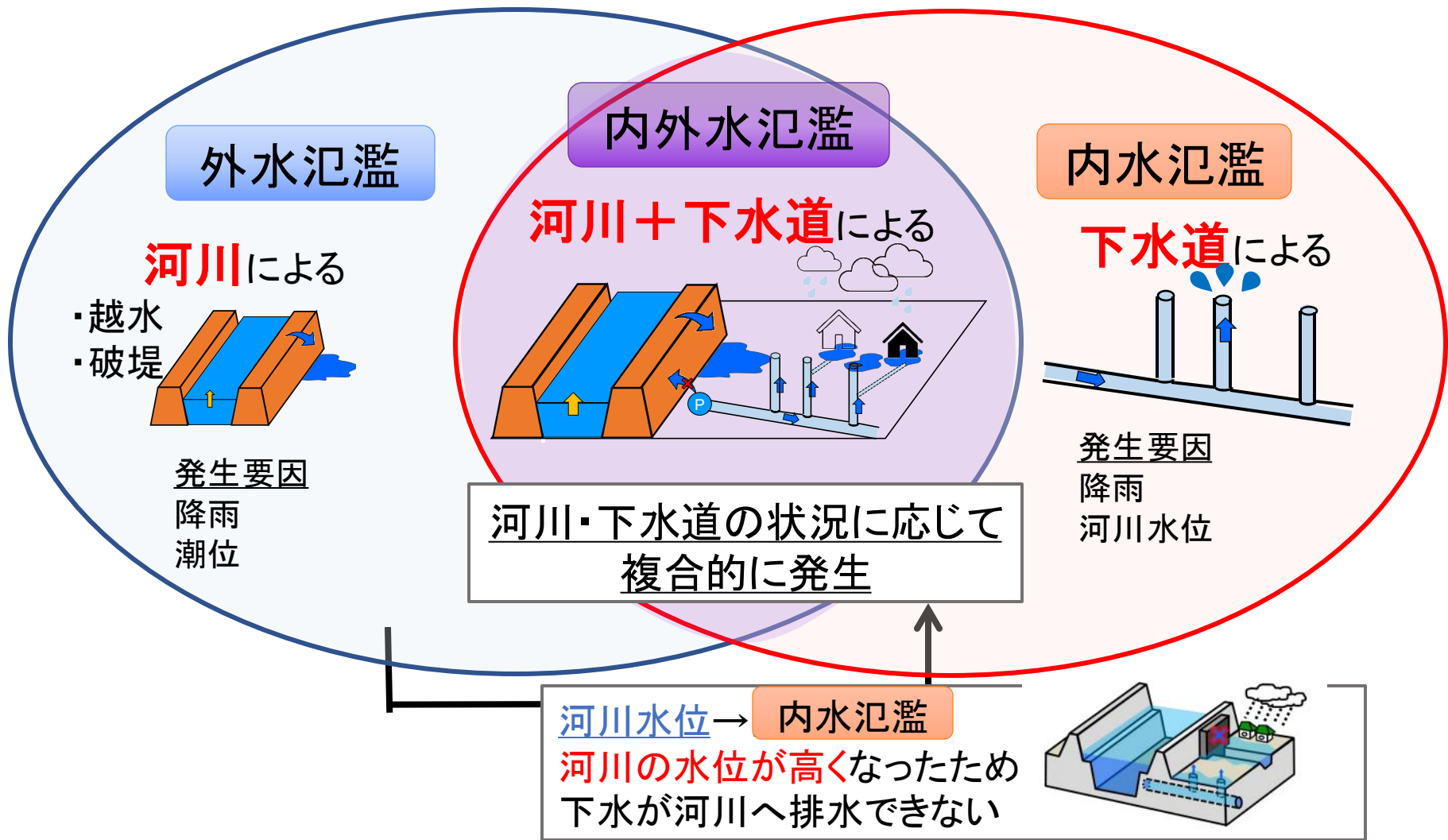
管路延長 約12600km
(東京-NY間距離と殆ど同じ)
マンホール数 約92000個
主な管轄下水処理場 神奈川再生センター

- 合流式下水道は約3割、分流式下水道の割合は約7割である
- 帷子川流域には分水路やポンプ場などの施設が存在する
- 横浜市西区においては全域で合流式下水道が使用されている

| | |
|------|-------|
| 合流幹線 | ポンプ場 |
| 合流枝線 | マンホール |
| 汚水幹線 | 雨水幹線 |
| 汚水枝線 | 雨水枝線 |

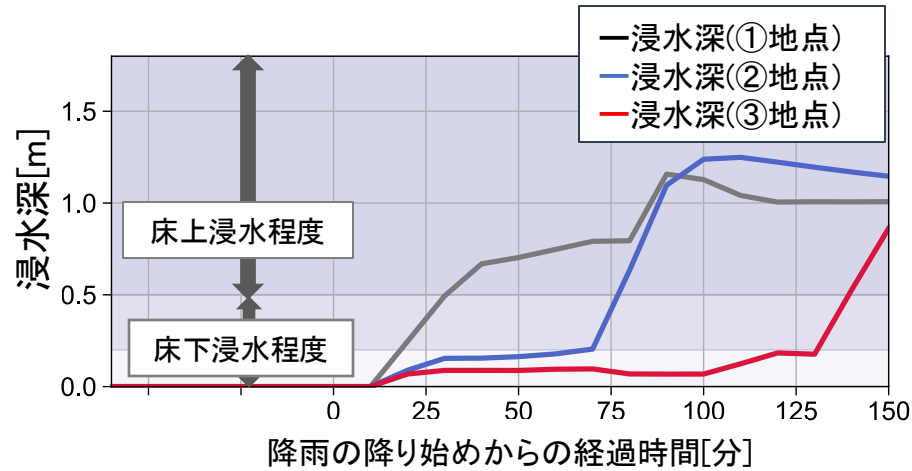
※横浜市環境創造局より提供して頂いた下水道台帳データをもとに作成

内水氾濫と外水氾濫の複合的発生



河川・下水道を一体的に考慮した
内外水氾濫解析を行う必要がある

内外水同時解析結果(時系列変化)



降雨強度70mm/hが1時間降り続いた場合

下流端条件:
満潮時平均潮位一定

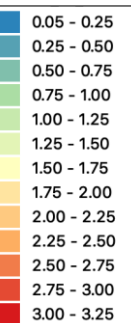
横浜駅

①

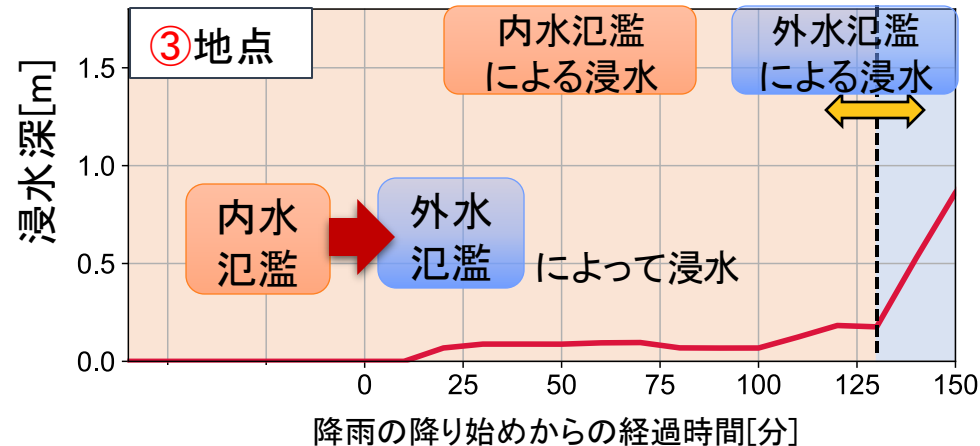
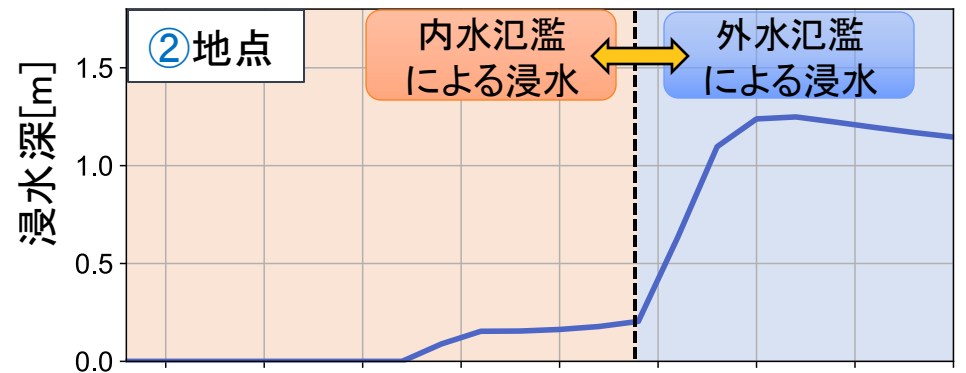
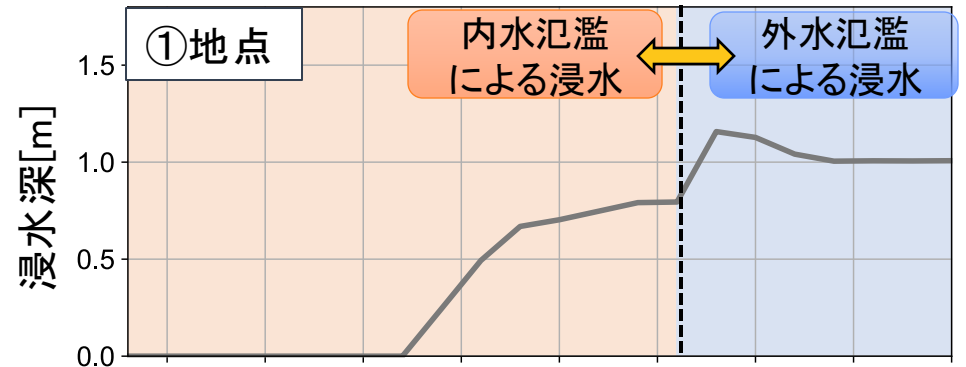
③

②

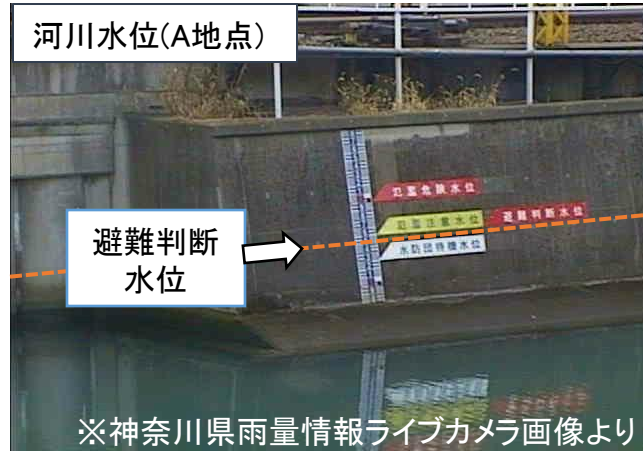
最大浸水深[m]



地点ごとの浸水深の時系列変化

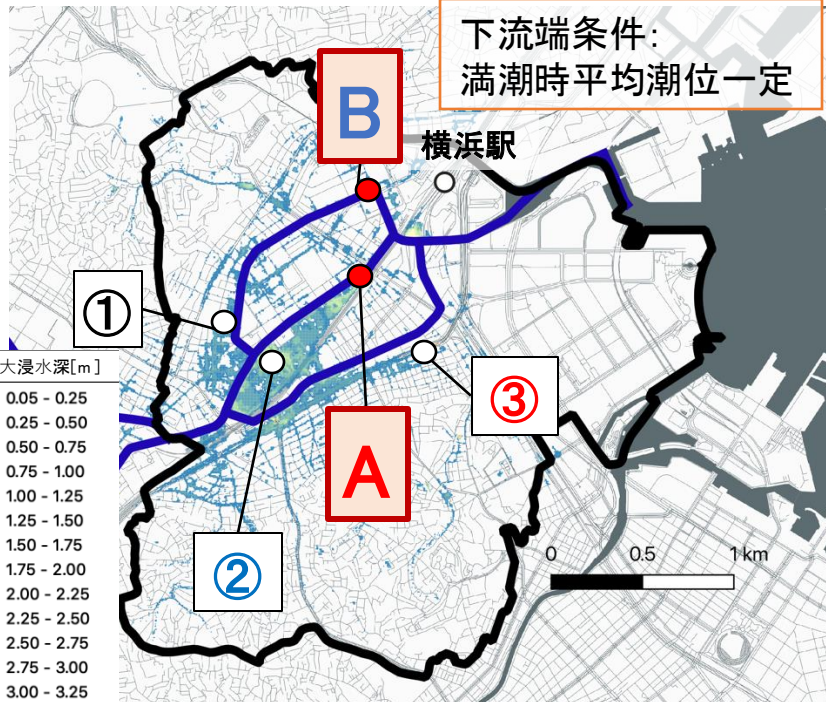


河川水位・浸水深の時系列変化

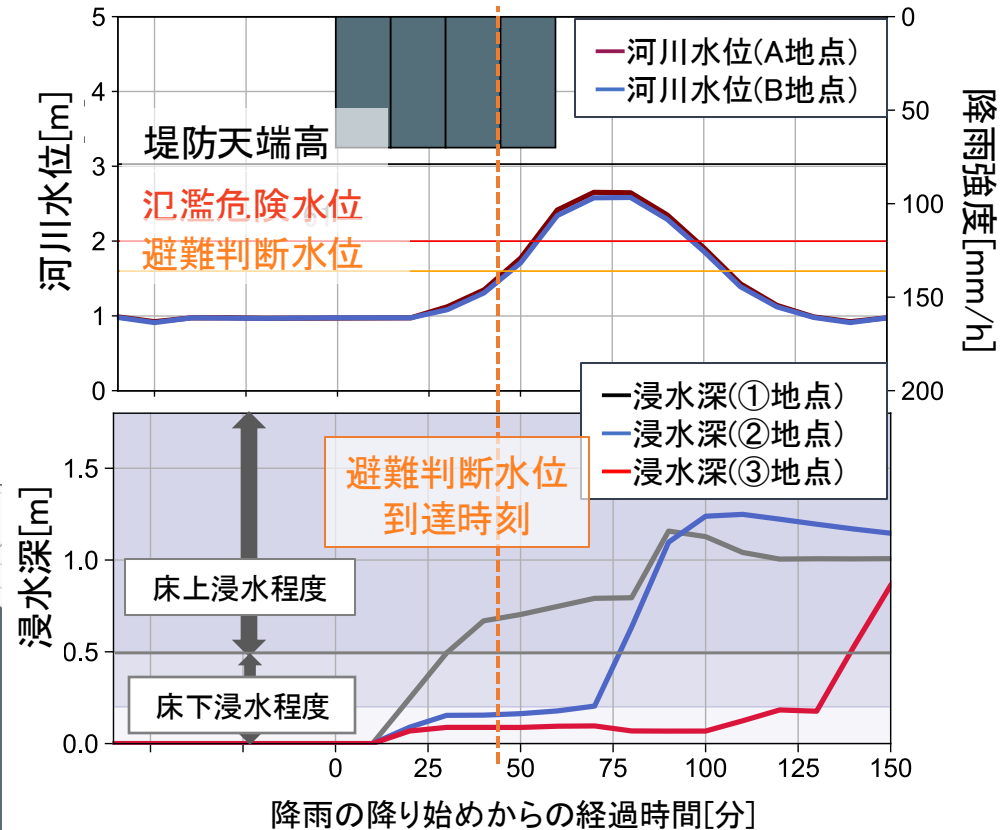


降雨強度70mm/hが1時間降り続いた場合

下流端条件:
満潮時平均潮位一定



河川水位・浸水深の時系列変化



避難判断水位に到達する時刻には、
既に内水氾濫が発生しており、
床下浸水及び床上浸水程度の浸水
が起きている