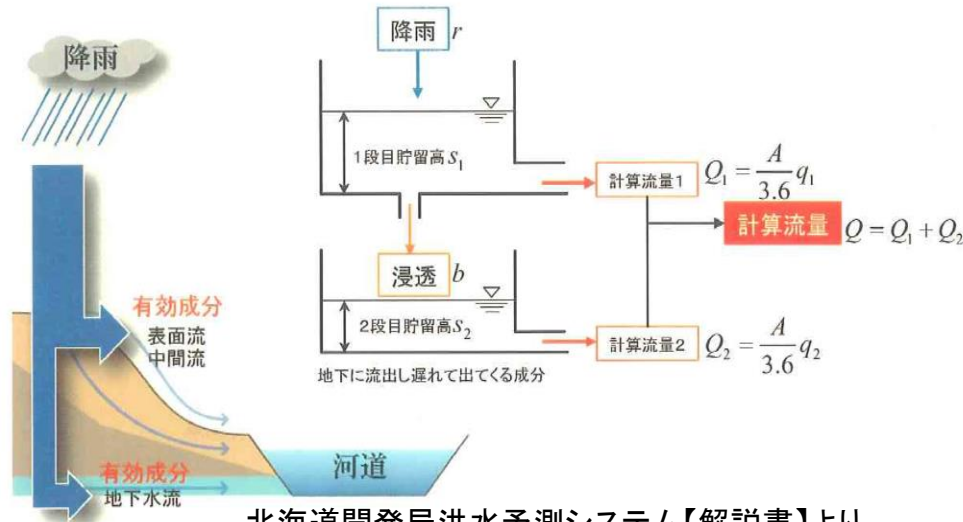


# 将来気候における洪水量の分析

# 流出計算

■ 流出モデルは、北海道の実洪水での活用実績がある分布型の2段タンク型貯留関数モデルを採用する。

## 2段タンク型貯留関数モデル



北海道開発局洪水予測システム【解説書】より  
(北海道開発局,平成19年3月)

## 基礎式(2段タンク)

$$\begin{cases} s_1 = k_{11}q_1^{p_1} + k_{12} \frac{d}{dt}(q_1^{p_2}) \\ \frac{ds_1}{dt} = r - q_1 - b \\ b = k_{13}q_1 \\ s_2 = K_{21}q_2 + k_{22} \frac{d}{dt}(q_2) \\ \frac{ds_2}{dt} = b - q_2 \\ q = q_1 + q_2 \end{cases} \quad \begin{cases} k_{11} = c_{11}A^{0.24} \\ k_{12} = c_{12}k_{11}^2\bar{r}^{-0.2648} \\ k_{13} = c_{13} - 1 \\ k_{21} = \frac{c_1}{c_0}k_{13} [c_0 = (\delta/T_c)^2] \\ K_{22} = \frac{1}{c_0}k_{13} [c_1 = \delta^2/T_c] \\ C_{11} = X \times f_c \\ f_c = (n/\sqrt{i})^{0.6} \end{cases}$$

モデル定数

## 基礎式(河道追跡)

$$\begin{cases} \frac{dA}{dt} + \frac{dQ}{dx} = 0 \\ Q = hBv \\ v = \frac{1}{n} h^{2/3} i^{1/2} \end{cases}$$

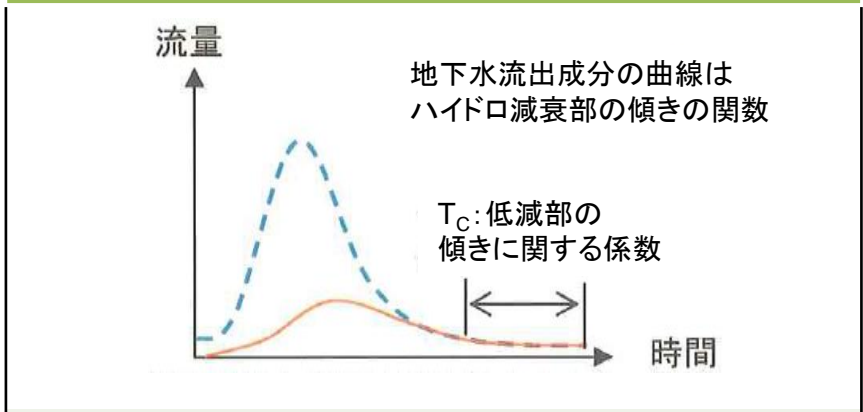
$s_1$ : 1段目タンク貯留高(mm)、 $s_2$ : 2段目タンク貯留高(mm)、 $r$ : 観測雨量(mm/h)、 $q$ : 全流出高(mm/h)、 $q_1$ : 表面・中間流出高(mm/h)、 $q_2$ : 地下流出高(mm/h)、 $b$ : 1段目タンクから2段目タンクへの浸透供給量(mm/h)、 $k_{11}, k_{12}, k_{21}, k_{22}$ : 貯留係数、 $k_{13}$ : 浸透係数、 $p_1, p_2$ : 貯留指数、 $A$ : 流域面積(km<sup>2</sup>)、 $\bar{r}$ : 平均雨量強度(mm/h)、 $c_{11}, c_{12}, c_{13}$ : モデル定数(未知定数)、 $f_c$ : 流域粗度、 $N$ : 等価粗度( $s/m^{1/3}$ )、 $i$ : 平均斜面勾配、 $p_1 = 0.6$ 、 $p_2 = 0.4648$ 、 $\delta = 2.1$ 、 $X$ : 未知定数、 $h$ : 水深(m)、 $B$ : 河道幅(m)、 $n$ : 河道粗度、 $i$ : 河道勾配

# 流出計算モデルー定数設定と計算結果の関係

■ モデル定数 $C_{11}$ 、 $C_{12}$ 、 $C_{13}$ 及び分離時定数 $T_C$ の値の変化によって、算出される流量は以下のように変化する。

$C_{11}$ : ハイドロのシャープさを表す	$C_{12}$ : ハイドロの時間的遅れを表す	$C_{13}$ : 流出量が地下に損失(浸透)する割合を表す
<p><math>C_{11}</math>を小さくするとピーク生起時刻が早まり、先鋭化する。</p>	<p><math>C_{12}</math>を小さくするとピーク生起時刻が早まる。</p>	<p><math>C_{13}</math>を小さくするとボリュームが増える。</p>

## $T_C$ : 地下水流出成分の低減部の傾きに関する係数



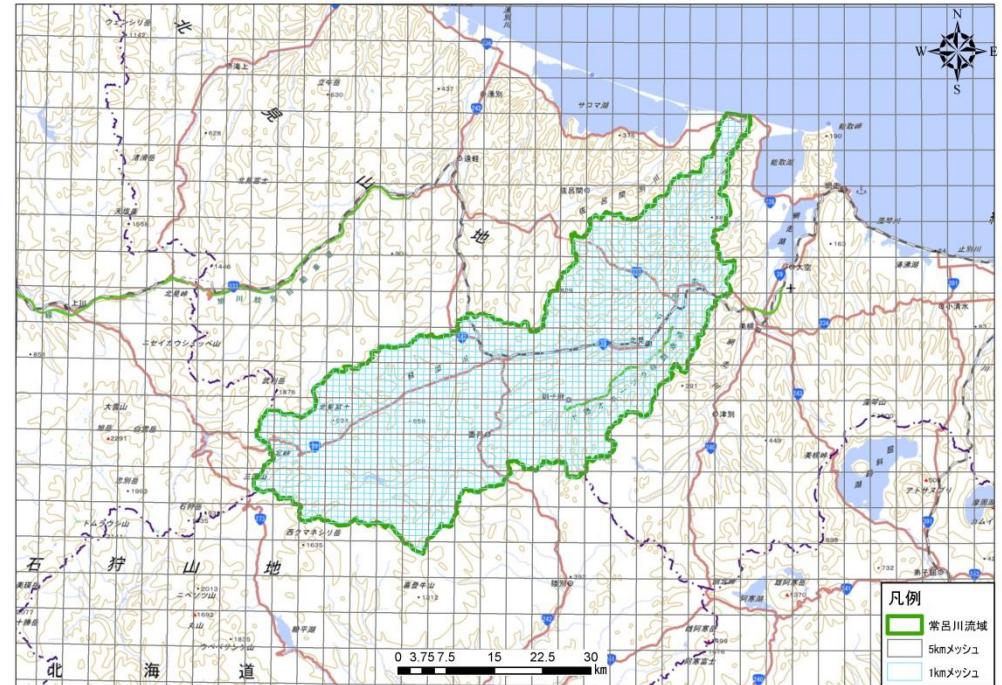
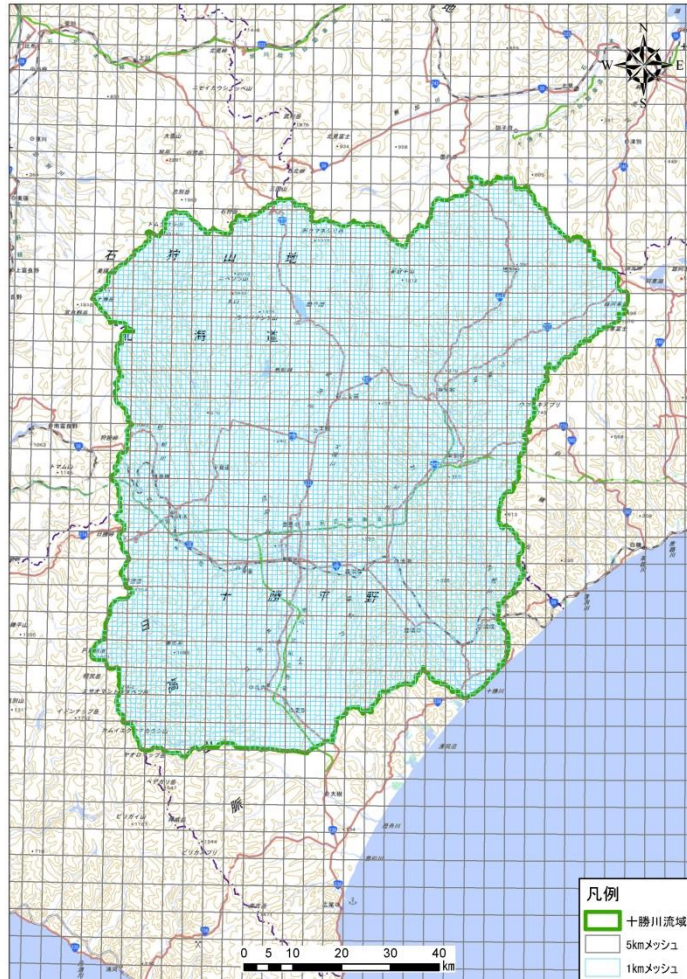
$T_C$ を変化させることで、地下水流出成分の低減部の傾きが変化する。

北海道開発局洪水予測システム【解説書】より  
(北海道開発局,平成19年3月)

# ダウンスケーリング後降雨データと分布型モデルメッシュサイズの関係

- メッシュサイズは、流域特性及び全国合成レーダ雨量の1kmメッシュ分布データを有効活用することを基本とし、地形勾配や流域形状、河道網を勘案し、現在配信されているレーダ雨量メッシュサイズと同様に1km分割とした。
- 入力する降雨データは5kmメッシュとなっており、その解像度を活かせる詳細なメッシュサイズとした。

各流域のメッシュ分割図(青線1kmメッシュ)

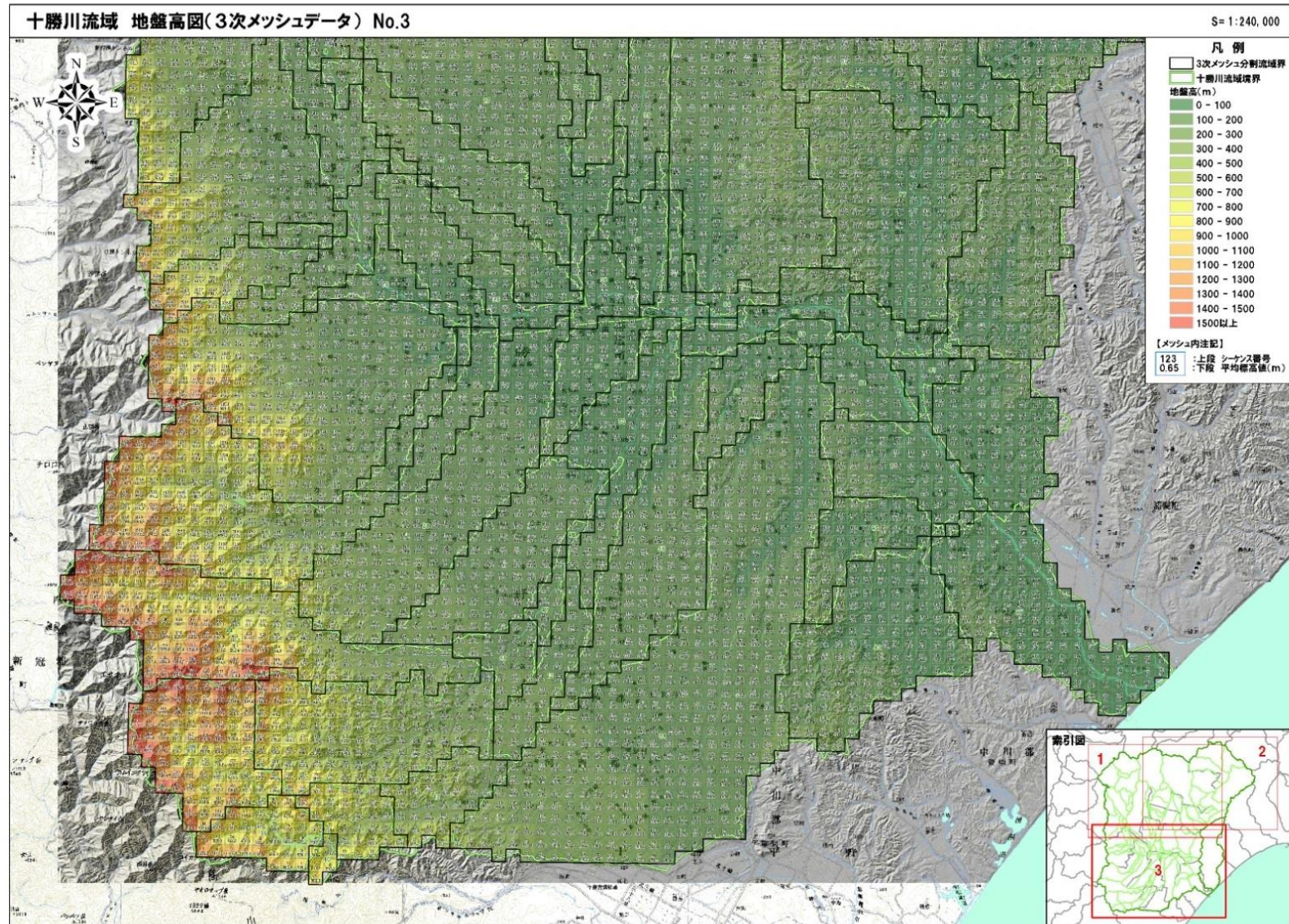


※d4PDFにおけるメッシュデータは緯度経度を基準に設定されている。5kmメッシュは、緯度経度方向ともに0.05度(=180秒)となっているため、実際には縦6km×横4kmの形に近いが、ここでは便宜上5kmメッシュと表現している。一方で、流出モデルの1kmメッシュは地域標準3次メッシュを使用している。地域標準メッシュは、できるだけ縦横の距離が等しくなるように設定されており、緯度方向45秒、経度方向30秒で設定されている。そのため、5kmメッシュ(180秒×180秒)内には、1kmメッシュ(45秒×30秒)は、縦6メッシュ、横4メッシュが含まれることになる。

# 標高データの設定

■ 各メッシュの標高データは、国土地理院の基盤地図情報数値標高モデル10mメッシュ(標高)を用いて設定した。

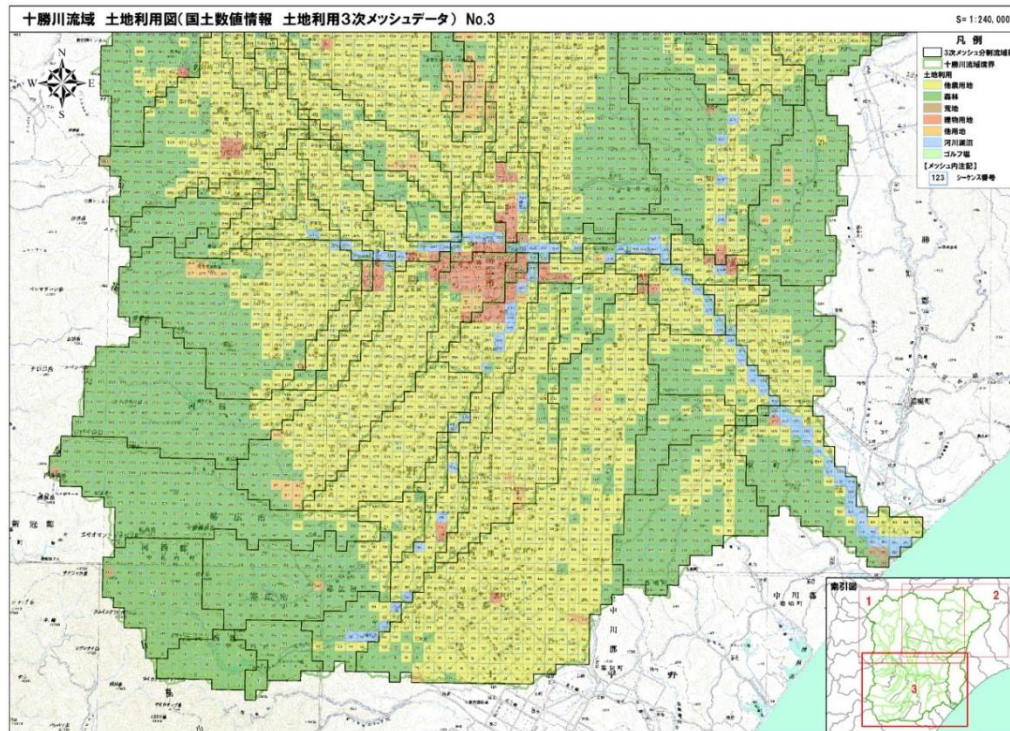
地盤高図(十勝川流域の一部)



# 流出量算出に用いる等価粗度の設定

- 国土数値情報等の土地利用データを基にした各メッシュの代表土地利用状況から、表面・中間流出の算出に必要な等価粗度を設定した。
- なお、等価粗度は水理公式集(平成11年版)を基に設定した。

土地利用状況図(十勝川流域の一部)



土地利用形態と等価粗度nの標準値

土地利用形態	等価粗度 $n(m^{-1/3} \cdot s)$	代表土地地目
水田	2.0	河川湖沼、水田
山林	0.7	森林
丘陵、畑地、 ゴルフ場、公園	0.3	他農用地、荒地、ゴルフ場
市街地	0.03	建物用地、他用地

『水理公式集(平成11年版)』

【参考】流域特性と等価粗度(田岡・日野、1965)

流域の状態	等価粗度 $n(m^{-1/3} \cdot s)$
階段状に宅地造成を行った丘陵地帯	0.05
流域の一部(15%)に宅地を含む丘陵地帯	0.1~0.2
階段状田畑主体流域	0.2~0.4
上流山地、中下流に市街地を含む階段状田畑主体流域	0.3~0.5
主として林相のかなりよい山地流域	0.4~0.8
上流丘陵地50%、中流市街地20%、下流低平水田30%の流域	0.6~1.1
排水改良の行われていない水田地帯	1~3

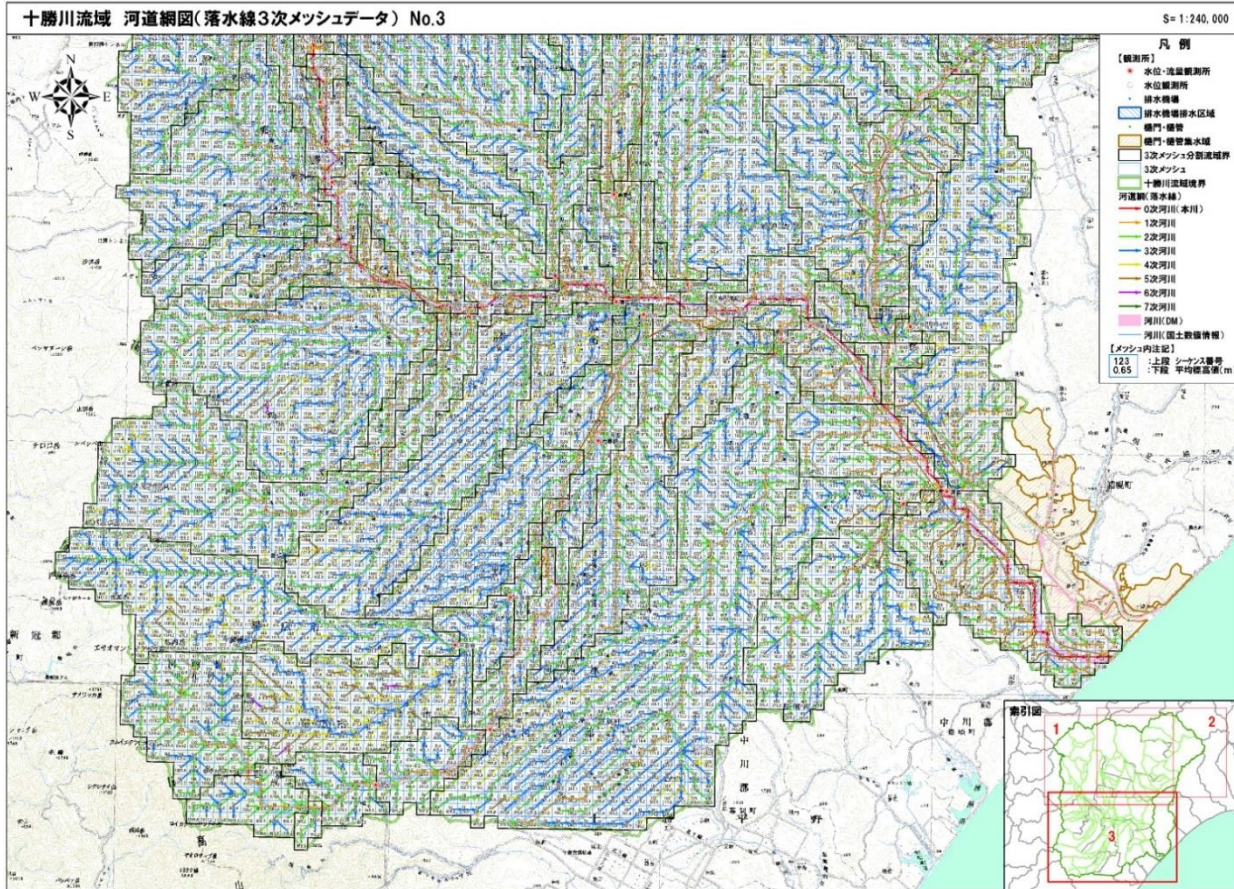
『国土交通省河川砂防技術基準 調査編及び参考となる資料(平成24年6月版)』

# 河道追跡に用いる粗度係数の設定

- 落水線は、各メッシュの地盤高を基に設定した。
- 河道追跡計算に用いる粗度係数は、「国土交通省河川砂防技術基準調査編及び参考となる資料(平成24年6月版)」より、山地流路の粗度係数0.030を採用した。

## 河道網図(十勝川流域の一部)

十勝川流域 河道網図(落水線3次メッシュデータ) No.3



## 河川や水路の状況と粗度係数の範囲

河川や水路の状況		マンニングの n の範囲
人工水路・改修河川	コンクリート人工水路	0.014~0.020
	スパイラル半管水路	0.021~0.030
	両岸石張小水路(泥土床)	0.025 (平均値)
	岩盤堀放し	0.035~0.05
	岩盤整正	0.025~0.04
	粘性河床、洗掘のない程度の流速	0.016~0.022
	砂質ローム、粘土質ローム	0.020 (平均値)
	ドラグライン掘しゅんせつ、雑草少	0.025~0.033
自然河川	平野の少流路、雑草なし	0.025~0.033
	平野の少流路、雑草、灌木有	0.030~0.040
	平野の少流路、雑草多、礫河床	0.040~0.055
	山地流路、砂利、玉石	0.030~0.050
	山地流路、玉石、大玉石	0.040 以上
大流路、粘土、砂質床、蛇行少	0.018~0.0353	
大流路、礫河床	0.025~0.040	

『国土交通省河川砂防技術基準  
調査編及び参考となる資料(平成24年6月版)』



# 流出計算結果ーピーク流量の頻度分布

- 第2回委員会において、十勝川では、規模の大きな洪水を対象に、平均的な傾向を示す平成23年9月洪水の再現定数を用いて、流出計算を実施した。
- 実績流量と過去実験結果の流出計算結果のピーク流量の頻度分布を比較したところ、実績値との乖離が生じている。

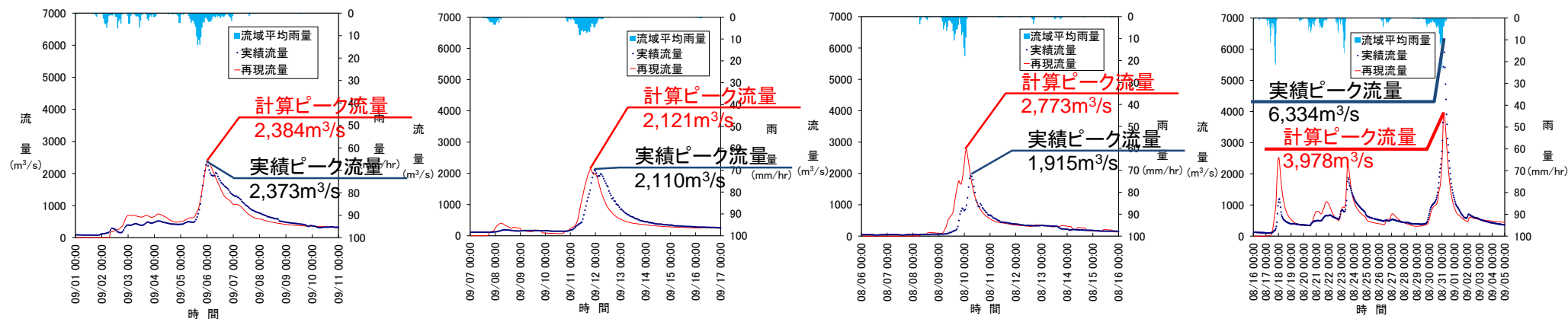
H23.9再現定数で主要な洪水を再現した結果

H23.9出水

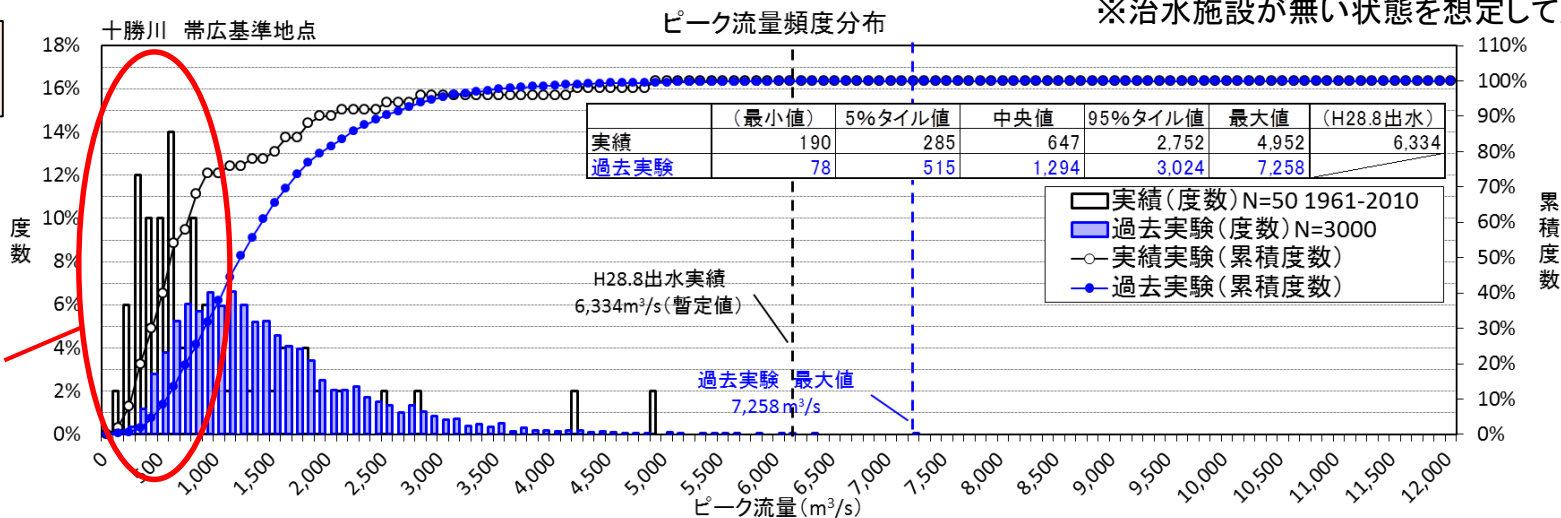
H13.9出水

H15.8出水

H28.8出水



十勝川  
帯広基準地点

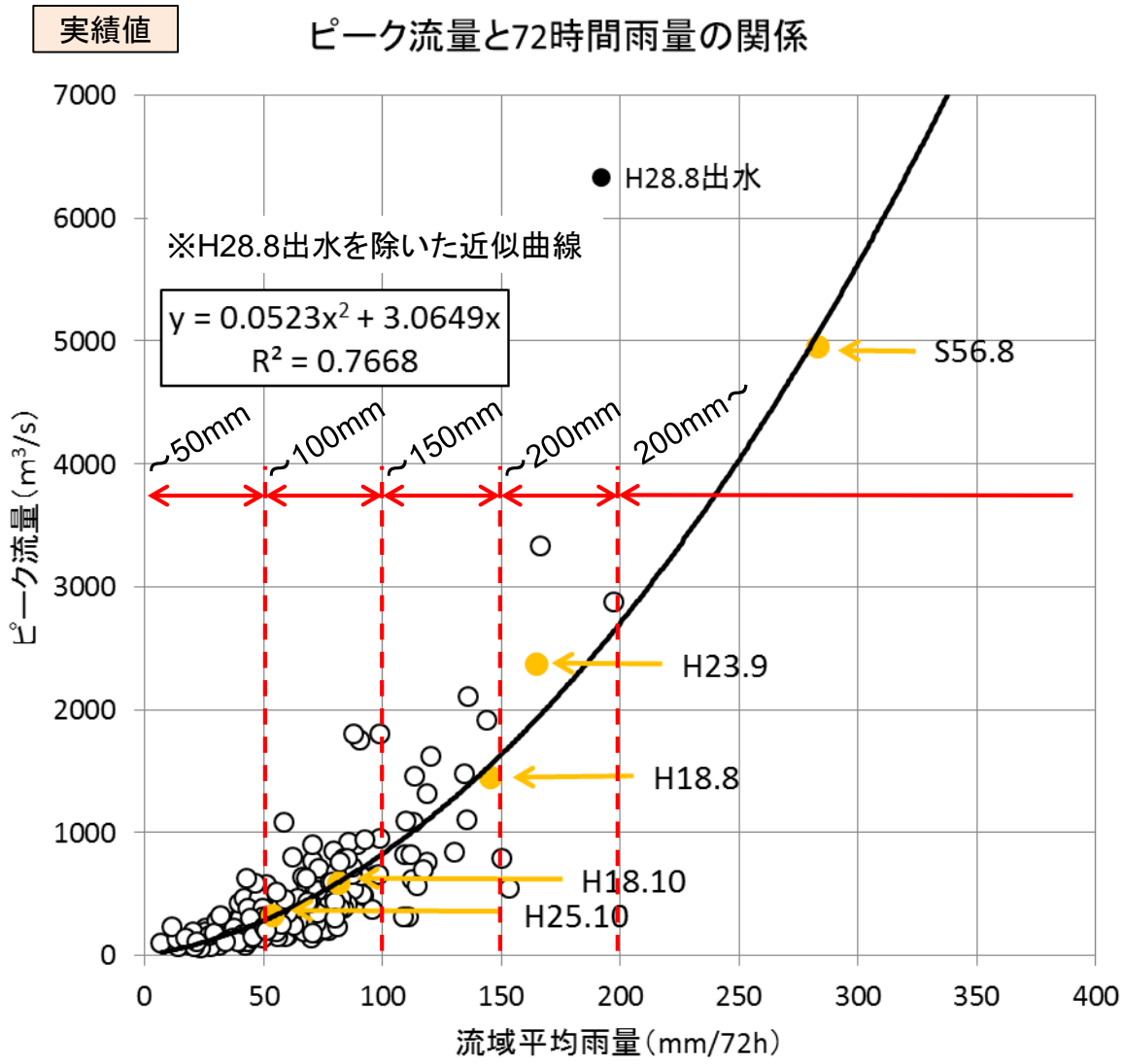


※治水施設が無い状態を想定して流出計算を実施

実績値との  
乖離が大きい範囲

# 再現対象降雨の選定

- 再現対象降雨事例は、ピーク流量と72時間雨量の関係式近傍に位置している降雨の中から、既に再現計算を実施したH23.9出水に加えて、4事例を選定した。
- なお、対象降雨はレーダー・アメダス解析雨量データが整備されている期間からの抽出を基本とした。



- 観測実績データについて
  - ・データの対象期間は、1955～2016年。
  - ・レーダー・アメダス解析雨量データが整備される以前については、アメダス観測データを使用している。
- 再現対象降雨の選定について
  - ・50mm毎に1降雨を選定することを基本とした。
  - ・S56.8出水については、レーダー・アメダス解析雨量データの整備期間外ではあるが、同規模の出水事例が他にないため、対象降雨とした。

# モデル定数 $C_{11}$ 及び $C_{12}$ と流域平均雨量の関係式の作成

- 流域平均72時間雨量によって、 $C_{11}$ 及び $C_{12}$ が調整されるように、関係式を流出計算モデルに組み込み、流出計算を実施する。
- 芽室太地点から帯広地点までの残流域でのモデル定数 $C_{11}$ の関係式は、 $y=676.95X^{-0.47}$ となった。

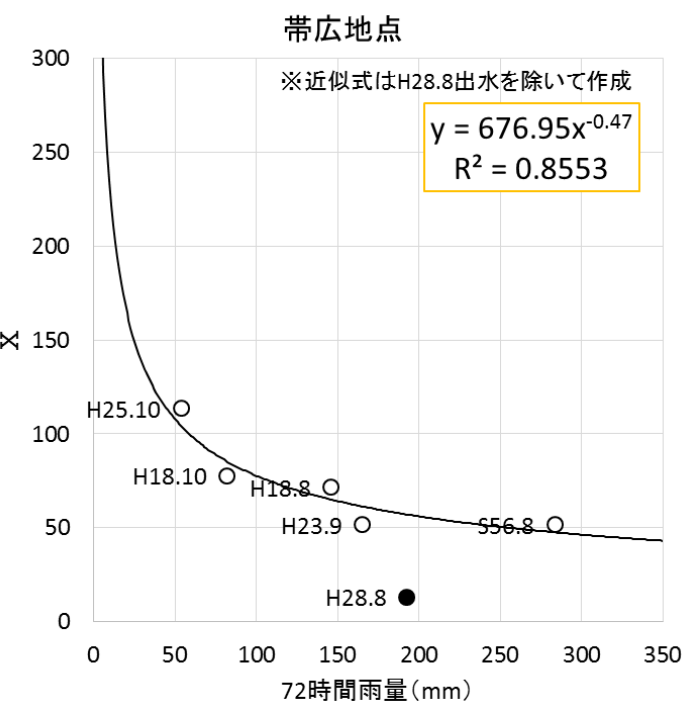
➤ 72時間雨量と帯広基準地点残流域で設定された $C_{11}$ 及び $C_{12}$ の関係

定数 $C_{11}$

$$k_{11} = c_{11}A^{0.24}$$

$$C_{11} = X \times f_c$$

$$f_c = (n/\sqrt{i})^{0.6}$$



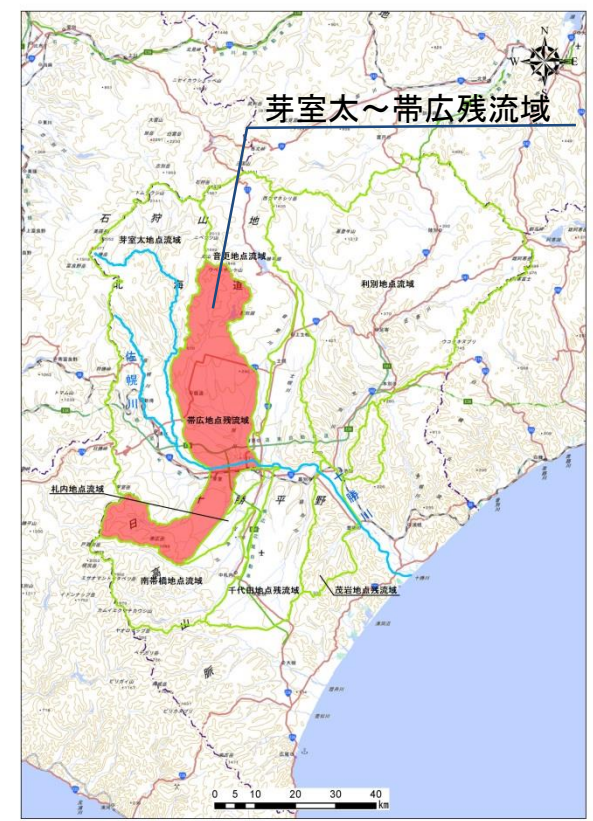
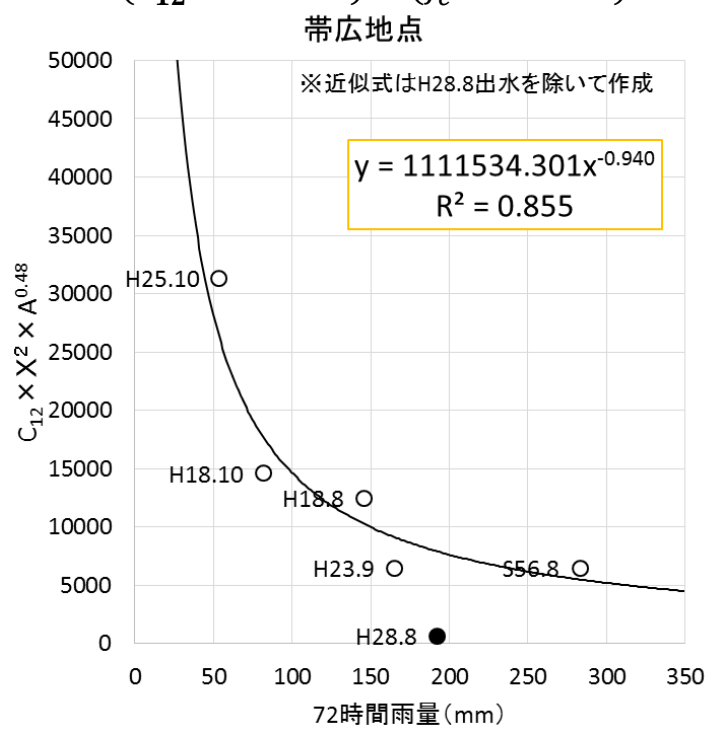
定数 $C_{12}$

$$k_{12} = c_{12}k_{11}^2\bar{r}^{-0.2648}$$

$$= c_{12} \times (c_{11}A^{0.24})^2 \times \bar{r}^{-0.2648}$$

$$= c_{12} \times (X \cdot f_c \cdot A^{0.24})^2 \times \bar{r}^{-0.2648}$$

$$= (c_{12} \cdot X^2 \cdot A^{0.48}) \times (f_c^2 \cdot \bar{r}^{-0.2648})$$



※分割流域毎に關係式を設定している。

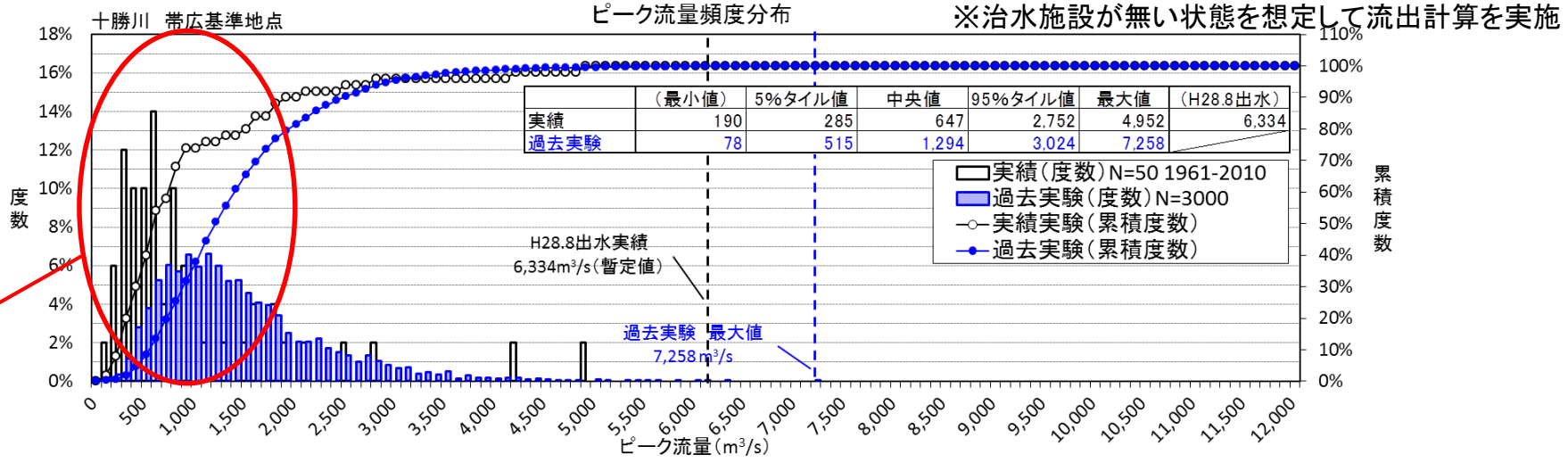
※ $f_c$ はメッシュ毎に異なり、 $\bar{r}$ は時系列で変化する。

# 将来気候における洪水量の変化【十勝川 帯広基準地点】

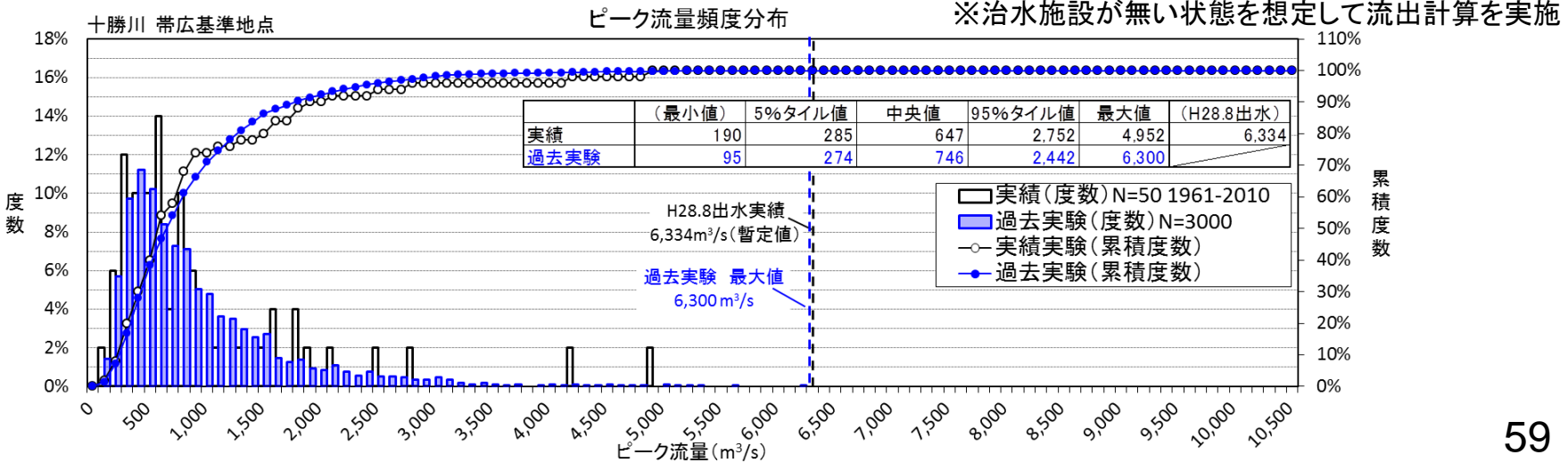
- C11関数化モデルを用いて、将来実験5400ケース、過去実験3000ケースの流出計算を行った。
- H23.9再現定数では、過去実験のピーク流量の中央値は1,294m<sup>3</sup>/s、実績のピーク流量中央値は647m<sup>3</sup>/sとなっており、規模の大きな出水に定数を合わせているため、小規模出水のピーク流量を過大評価している可能性が考えられる。
- C<sub>11</sub>を関数化することで、度数分布の適合性は著しく改善した。一方で、降雨量について観測実績と過去実験補正値の95%タイル値では6%増加しているが、洪水量については、2,752m<sup>3</sup>/sから2,442m<sup>3</sup>/sへと11%減少している。

H23.9出水  
再現定数

実績値との  
乖離が大きい範囲



C11関数化



# 降雨と流出の関係－観測実績との比較

■ H23.9定数モデルでは、総雨量の少ない降雨でのピーク流量が大きくなっている。一方、C11関数化モデルでは、H28.8実績洪水が流出計算の範囲から外れる等、防災上重要となる規模の大きな洪水に対して過小評価になっている可能性がある。

## 72時間雨量とピーク流量の関係

観測実績の整理方法

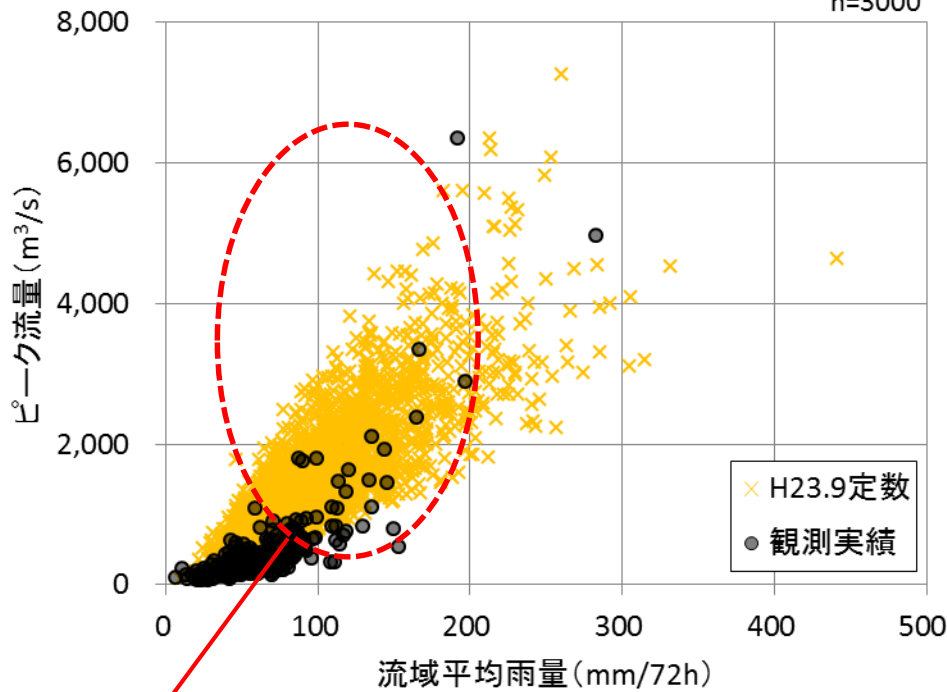
- 整理期間: 1955年～2016年の6月～11月
- 使用データ: アメダス観測データ及びレーダー・アメダス解析雨量
- 事例数: 214

H23.9定数モデル

十勝川 帯広基準地点

実績と過去実験H23.8定数

n=3000



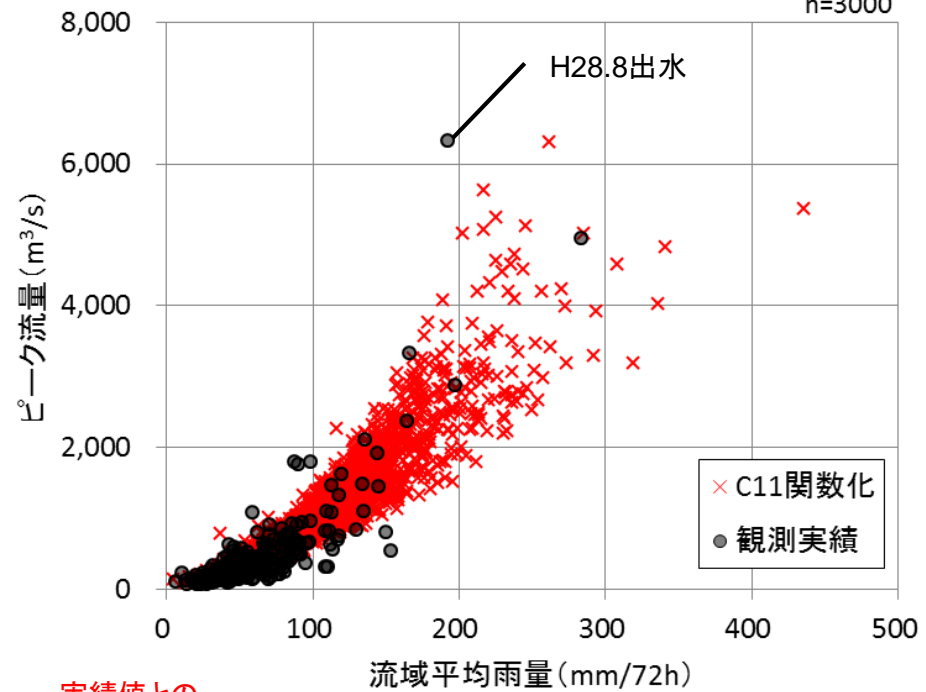
特に100～150mm程度の範囲で、実績と実験値のピーク流量に乖離がある。

C11関数化モデル

十勝川 帯広基準地点

実績と過去実験C11関数化モデル

n=3000

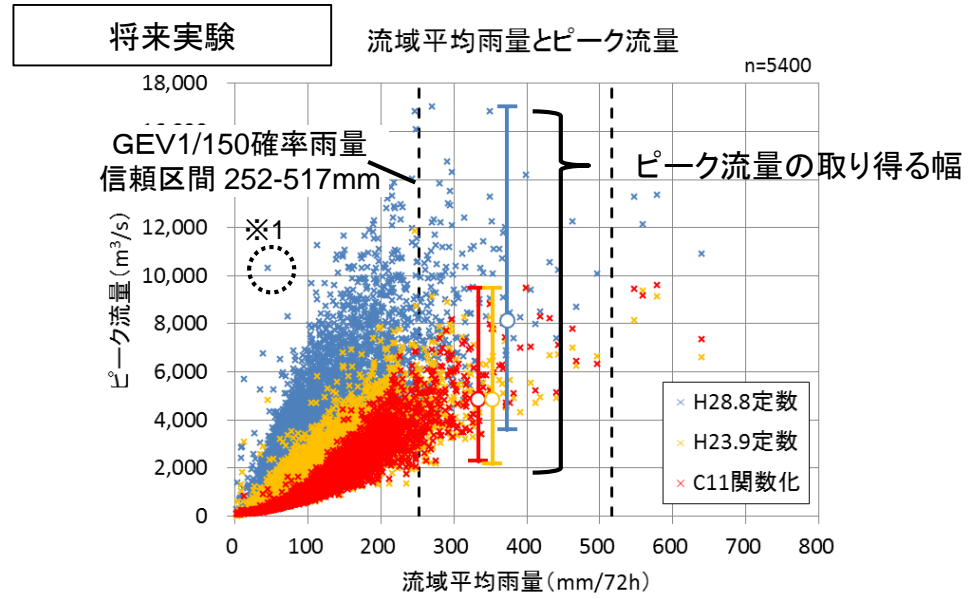
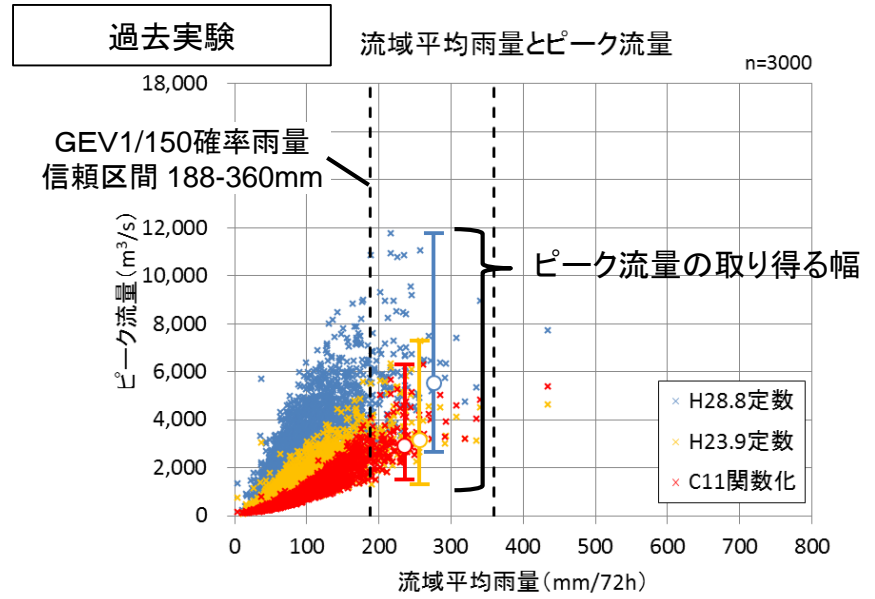


実績値との乖離が解消された

# 気候変動による洪水量の変化(十勝川)

- 洪水流出計算手法については、課題が残されているため、十勝川については、1/150確率雨量の信頼区間内のピーク流量の中央値を、計算手法毎に表すこととした。
- 十勝川では、過去実験で2,900~5,500m<sup>3</sup>/s、将来実験で4,900~8,100m<sup>3</sup>/sとなり、約1.5倍~1.7倍に増加する。
- なお、リスク評価については、観測実績との適合が高かったC<sub>11</sub>関数化モデルの結果を用いることとする。

## ➤ 設定する定数によるピーク流量の違い



## ➤ 1/150確率降雨信頼区間内のピーク流量の中央値 ※()内は最小値~最大値

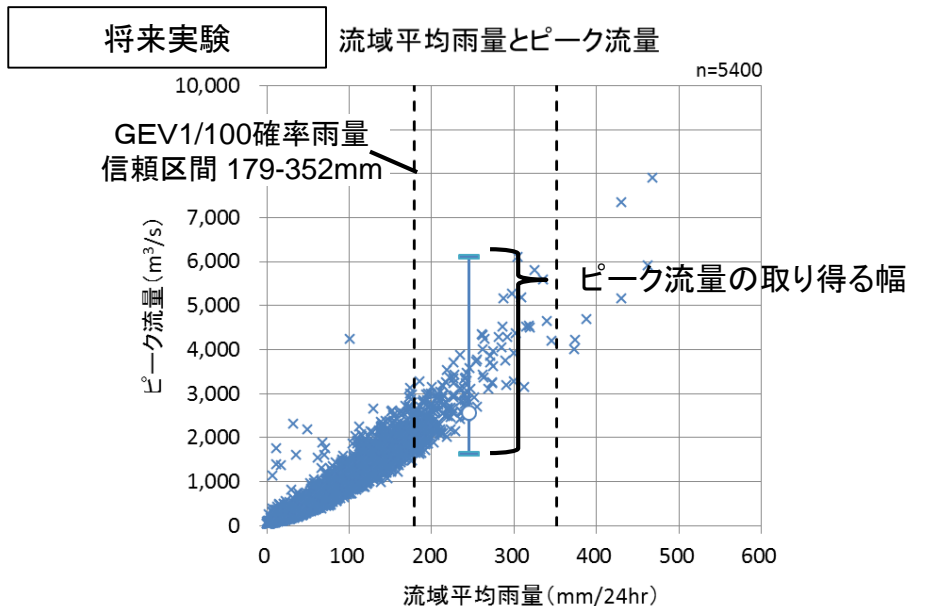
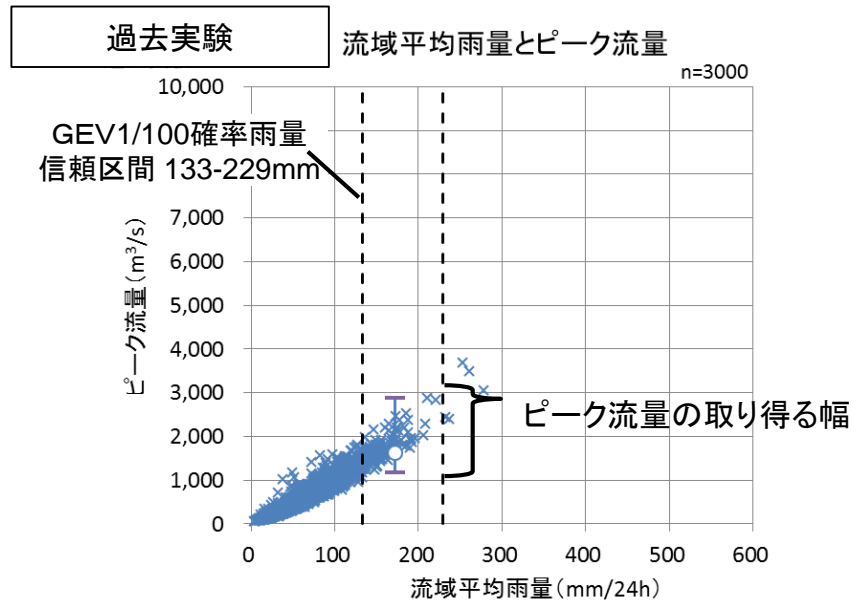
	過去実験 (m <sup>3</sup> /s)	将来実験 (m <sup>3</sup> /s)	変化
C11関数化	2,917 (1,508~6,300)	4,852 (2,278~9,485)	1.66倍
H23.9再現定数	3,157 (1,293~7,258)	4,861 (2,154~9,491)	1.54倍
H28.8再現定数	5,535 (2,658~11,750)	8,134 (3,586~17,024)	1.47倍

※1: 流出計算期間内の総雨量が大きく、72時間雨量に対して、流出が著しく大きくなっているケースが一部ある。

# 気候変動による洪水量の変化(常呂川)

- 常呂川については、H28.8再現定数の流出計算結果を基に、1/100確率雨量の信頼区間内のピーク流量の中央値を表すこととした。
- 常呂川では、過去実験で1,600m<sup>3</sup>/s、将来実験で2,600m<sup>3</sup>/sとなり、約1.6倍に増加する。

## ➤ 設定する定数によるピーク流量の違い



➤ 1/100確率降雨信頼区間内のピーク流量の中央値 ※()内は最小値～最大値

	過去実験 (m <sup>3</sup> /s)	将来実験 (m <sup>3</sup> /s)	変化
H28.8再現定数	1,630 (1,172~2,869)	2,557 (1,629~6,097)	1.57倍

# 大量アンサンブル実験データの利点



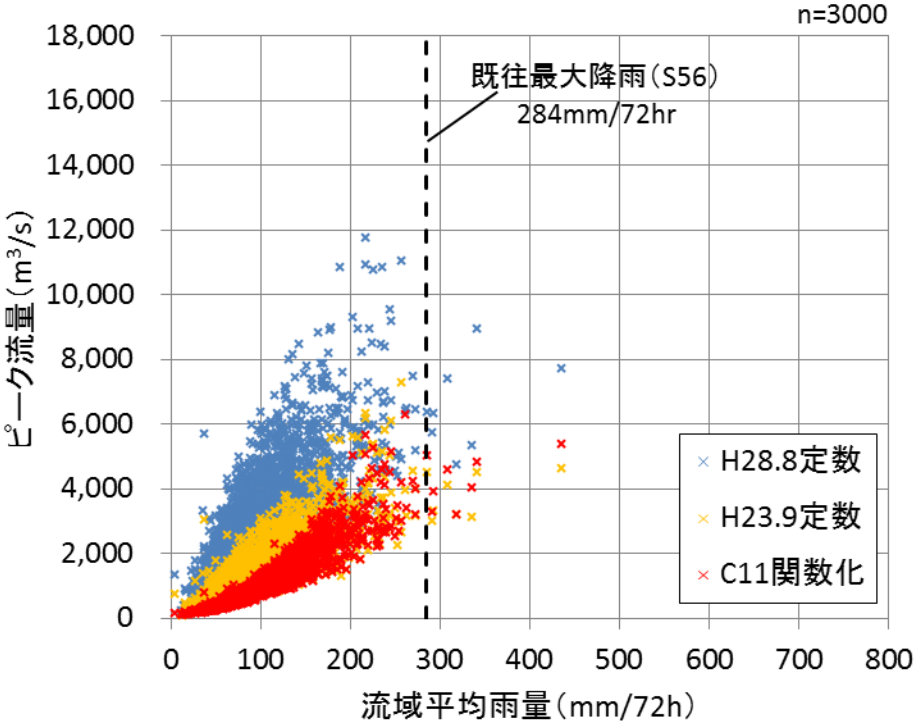
# 既存手法と実験データを使用した場合の外力設定の比較(十勝川)

- これまでは、降雨観測データが限られていたため、観測値を超える降雨量を扱う場合には、実績降雨波形を引き延ばすことが必要であったが、気象シミュレーションを用いることにより、相当する降雨量の時空間分布を得ることが可能となった。
- 一方、全ての河川で多数の流出計算を実施することは困難であるが、過去3000年、将来5400年分の流出計算を実施したことにより、既存の降雨波形を引き延ばした場合にも、時空間分布に基づく流出計算結果の幅に入ることを確認した。

十勝川  
帯広基準地点

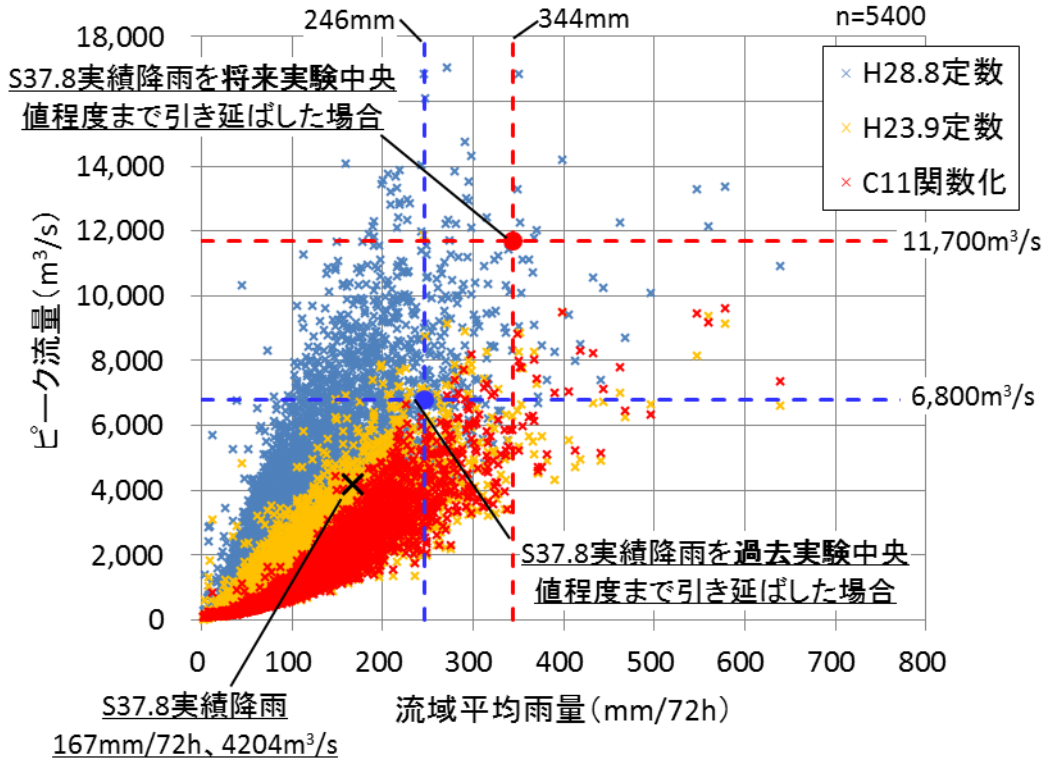
十勝川帯広基準地点  
過去実験

流域平均雨量とピーク流量



十勝川帯広基準地点  
将来実験

流域平均総雨量とピーク流量

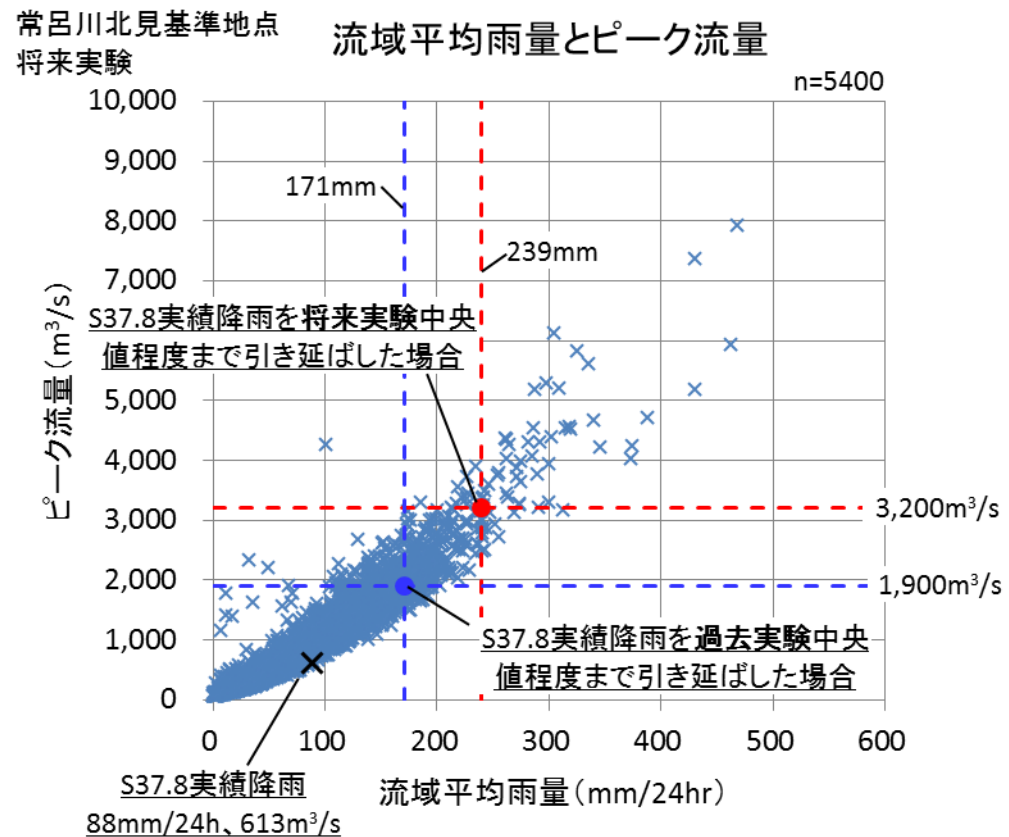
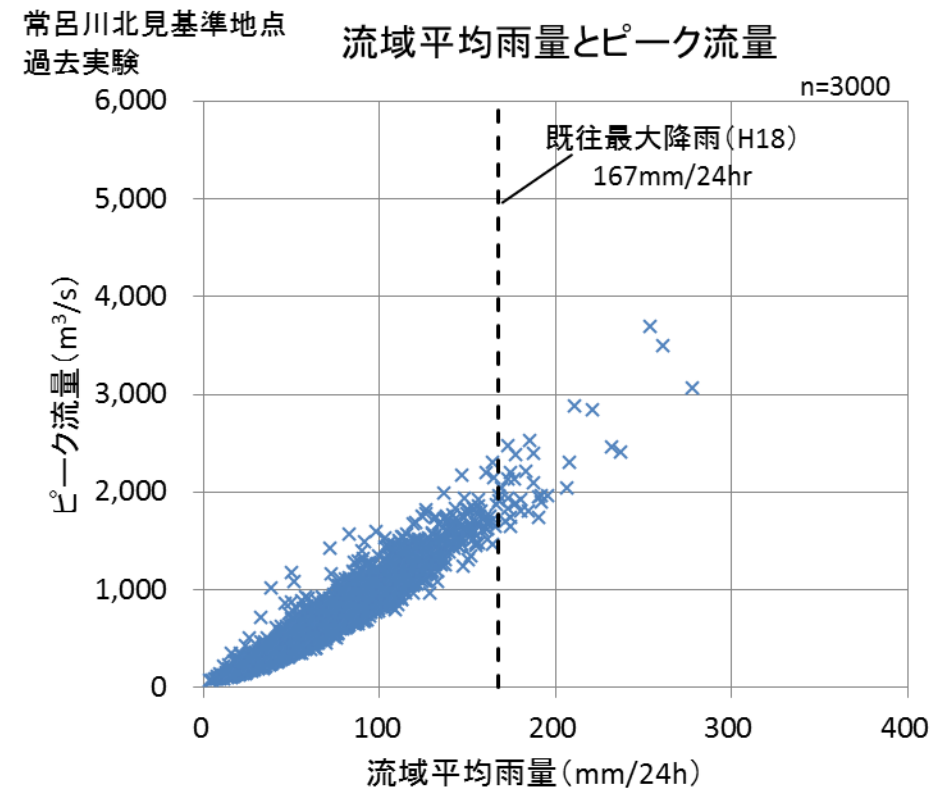


※S37.8降雨の流出計算は、既存の貯留関数、流域定数を用いている。

# 既存手法と実験データを使用した場合の外力設定の比較(常呂川)

- これまでは、降雨観測データが限られていたため、観測値を超える降雨量を扱う場合には、実績降雨波形を引き延ばすことが必要であったが、気象シミュレーションを用いることにより、相当する降雨量の時空間分布を得ることが可能となった。
- 一方、全ての河川で多数の流出計算を実施することは困難であるが、過去3000年、将来5400年分の流出計算を実施したことにより、既存の降雨波形を引き延ばした場合にも、時空間分布に基づく流出計算結果の幅に入ることを確認した。

常呂川  
北見基準地点



※S37.8降雨の流出計算は、既存の貯留関数、流域定数を用いている。

# まとめ①一降雨分析結果

## ● 将来気候における降雨量の変化

- 各流域ともに、将来実験は過去実験の約1.4倍に増加した。
- 同一の確率規模では、将来実験と過去実験の降雨の信頼区間が重複しており、気候変動後の降雨は現在気候においても発生する可能性がある。

確率雨量の分布の中央値(GEV分布)

対象流域	降雨継続時間／確率規模	流域面積 (km <sup>2</sup> )	過去実験 (mm)	将来実験 (mm)	変化
十勝川 帯広地点	72時間／1/150確率	2,678	256	353	1.38倍
十勝川 佐幌川流域	72時間／1/100確率	385	277	395	1.43倍
常呂川 北見地点	24時間／1/100確率	1,394	172	245	1.42倍
常呂川 無加川流域	24時間／1/100確率	559	172	246	1.43倍

## ● 抽出計算手法の通年データを用いた検証

- 通年計算データから年最大降雨が異なるケースは1割程度であり、降雨の変化量の平均も0mm付近であることから、抽出計算による年最大降雨量の算出への影響は小さいと考えられる。

## ● 流域面積による違い

- 流域面積の違いによる気候変動の影響を確認したが、度数分布におけるクオンタイル値の変化率では明瞭な違いは見られなかった。一方で、メッシュ毎の降雨の変動係数では、流域によって違いがあることから、他流域やより小流域を対象に気候変動の影響の現れ方について分析を行う必要がある。

# まとめ①一流出計算結果

## ● 将来気候における洪水量の変化

確率雨量(GEV分布)の信頼区間内のピーク流量の中央値

対象流域 ・地点	定数	過去実験 (m <sup>3</sup> /s)	将来実験 (m <sup>3</sup> /s)	変化
十勝川 帯広地点	C11関数化	2,917 (1,508~6,300)	4,852 (2,278~9,485)	<u>1.66倍</u>
	H23.9再現定数	3,157 (1,293~7,258)	4,861 (2,154~9,491)	<u>1.54倍</u>
	H28.8再現定数	5,535 (2,658~11,750)	8,134 (3,586~17,024)	<u>1.47倍</u>
常呂川 北見地点	H28.8再現定数	1,630 (1,172~2,869)	2,557 (1,629~6,097)	<u>1.57倍</u>

※()内は最小値～最大値

- 十勝川帯広地点では、洪水量は実施した3パターンの定数により異なるが、将来実験が過去実験の約1.5~1.7倍となった。
- 常呂川北見地点では、洪水量は将来実験が過去実験の約1.6倍となった。

## ● 時空間分布の活用

- これまでは、降雨観測データが限られていたため、観測値を超える降雨量を扱う場合には、実績降雨波形を引き延ばすことが必要であったが、気象シミュレーションを用いることにより、相当する降雨量の時空間分布を得ることが可能となった。
- 過去3000年、将来5400年分の流出計算を実施したことにより、既存の降雨波形を引き延ばした場合にも、時空間分布に基づく流出計算結果の幅に入ることを確認した。