

流域管理と地域計画の連携に向けて ー 流域水収支図と流域土砂収支図の作成と活用 ー

キーワード

「自然と人間の共生」, 「流域水収支図」, 「技術」, 「社会」, 「協働」

講演内容

1. 流域治水の考え方と技術について
2. 豪雨時の流域水収支分布の算定法
3. 石狩川支川豊平川流域の「流域水収支図」の作成
4. 人吉市街地における内水氾濫時の流域水収支図とその活用
5. 流域土砂収支を流域水収支と一体的に検討するためには
6. まとめ
 - (1) 本川，支川流域での流域水収支図の作り方とその活用
 - (2) 内水氾濫流域における水収支図とその活用

参考文献

1. 流域治水の考え方と技術について

「流域治水」は、流域の関係者が協働して安全な流域を創っていくことを狙いとしており、流域に住む人々（防災関係者を含む）の理解が不可欠である。このため、「流域治水」には、流域の有する自然と人の共生を第一に考え、自然の価値と災害リスク、自然と人の営みにどのように折り合いをつけるかを原点に考えることが求められる。

このため、流域治水においては、流域に降った豪雨（降水）が「いつ」、「どこに」、「どのような量」が「どのような状態で」存在しているか、降雨・流出の過程を「現地観測データ」と「解析モデル」を用いて水の時・空間的分布をわかりやすい形で推算し、「流域水収支図」として見える化し、活用する。

流域水収支分布等に基づき流域の地形、地質、農・林業等土地利用の状況、人々の住み方や災害の履歴、計画上の河道断面形等から、洪水流出を抑制するための土地の利用可能空間等を調べ、洪水流の貯留等による流域の流量低減効果を検討する上で重要な手段を与える。

流域治水は、①支川群の各小流域の治水マネジメント、②これらの小流域を統合して流域全体を見た治水マネジメント、③洪水氾濫が集中する市街地域を一つの小流域としてこの地域の減災を図る治水マネジメント等多層的であり、それぞれの流域スケールに応じた「技術」と「協働」のあり方が求められる。

流域において起こる水災害に対して、「技術的」にどのように対応するかは、主に河川管理者の責務であるが、「流域関係者との協働」なくしては達成できず、このことが流域治水を進めていくうえでの大きな課題である。

流域治水で考えられる対策のメニューは各河川流域ごとに異なり、またメニューを実現させる方策は、流域全体としてみるのか、または小流域みるのかによって異なる。流域治水対策への地域からの提案は、特に重要である。提案の優先順位は、自然的、技術的、そして社会的、経済的にみて実効性が高いことが必要である。このためには、河川管理者は、それぞれの流域での水収支分布等から科学的、工学的に検討を行えるようにし、これを受けて地域の流域関係者からなる流域協議会等で十分議論して決定していくことが望ましい。

冒頭に示した「**自然と人間の共生**」,「**流域水収支図**」,「**技術**」,「**社会**」,「**協働**」をキーワードとして流域治水を具体的に進めるためには、

第1に自然現象としての豪雨による洪水流の流動を本川、支川の流域レベルで捉えることを目的に、流域に降った豪雨が、いつ、どこに、どのような量がどのような状態で存在し流れているかを、主に水文学・河川工学の学術、技術に基づいて一体的に捉え、「**流域水収支図**」を作成する。

第2に, この「**流域水収支図**」から得られる流域の水の挙動に着目し、自然の法則に基づく水の貯留・流動空間の活用が、流域全体や対象流域ごとの水収支分布をどのように変化させるか、特に水害軽減の観点から見える化し検討する。

第3に, 内水、外水氾濫に対する住民避難、減災地域づくり、まちづくりに向けて関係者の「議論」と「協働」のために「**流域水収支図**」が重要なツールとする。

本講演では、「**流域水収支図**」の作成と活用に対する2つの検討事例を提示している。一つ目は、上述の第1と第2の課題に対し石狩川支川豊平川流域における**流域水収支図の作り方とその活用方法**,二つ目は、令和2年の熊本豪雨による人吉市の内水氾濫に対する『**流域水収支図**』の**住民避難、減災まちづくりへの活用方法**が示される。最後に「**流域水収支**」と一体的な**考慮が望まれる「流域土砂収支図」**の検討方法と課題を述べている。

2. 豪雨時の水収支分布図の算定法

2. 豪雨時の流域水収支分布の算定法

(1) 本・支川洪水流の河道水収支分布

河道の水収支の時空間分布は、流域の本川、支川群の河道沿いに危機管理型水位計を含む多数の水位計を設置し、洪水中の各河道の水位の時・空間分布を観測し、縦断水面形の時間変化を求める。これと既知の河道の縦横断面形を用いて解析モデルでの縦断水面形の時間塩化が実測とよく対応するように求めた解析水理量（水位分布、流速分布、等）から各断面の流量を求める。洪水流の河道貯留量 S_{river} は、式(1)で与えられることから式(1)の時間積分で河道貯流量 S_{river} を求める。

$$(d S_{river})/dt = Q_{in} - Q_{out} \quad (1)$$

対象とする河川の洪水水面形とそれに対する流速分布の時間変化が求められているので、対象河川での河道貯留量 S_{river} を計算できる。これを流域全体の河川群に広げることによって、流域の河川群の水収支の時空間分布を得る。

式(1)において、 S_{river} は、対象河川において Δx 離れた二つの断面間の洪水貯留量(m^3)、 Q_{in} は、上流断面からの流入流量とこの河川区間に流入する支川の流量の合流量であり、 Q_{out} は、下流断面からの流出流量(m^3/s)である。

(2)流域水収支分布

流域水収支の時空間変化は、流域における雨量の時空間分布、流域で存在している水量（表面流、中間流、地下水流）の時間変化、流域を構成する河道の貯留量の時間変化、ダムや遊水地等で調節した貯水容量の時間変化とすると、式(2)により表される。

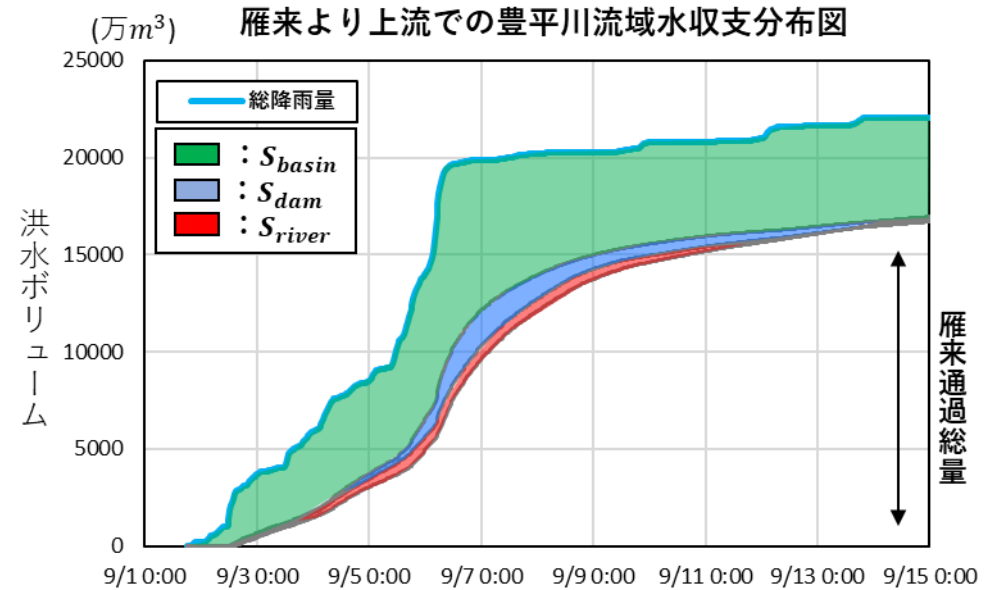
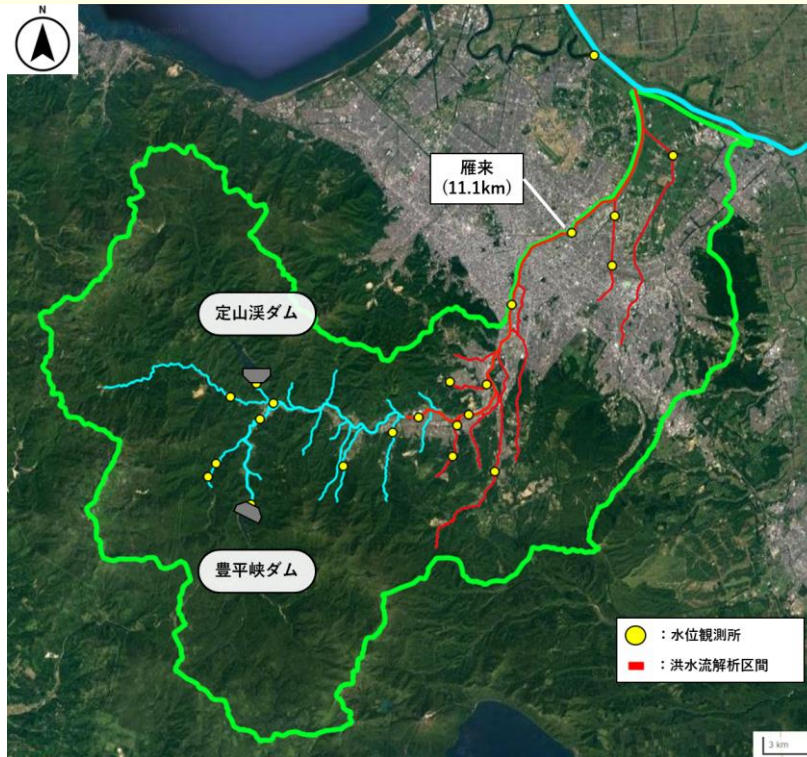
$$dS_{\text{river}}/dt + dS_{\text{dam}}/dt + dS_{\text{basin}}/dt = A \cdot R / 3.6 - Q_{\text{out}} \quad (2)$$

ここに、 A は流域面積(km²)、 R は流域に降った雨量(mm/hr)、 S_{river} は河道の貯留量、 S_{dam} はダムや遊水地等の洪水調節施設や湖の貯水量(m³)、 S_{basin} はその時刻において河川やダム等に流入しておらず流域で存在している水量(m³)、 Q_{out} は、対象流域の流末から流出する流量である。

式(2)においては、河川の洪水水面形の時間変化（貯留量の時間変化）やダム貯水池等での貯留量の時間変化から S_{dam} 、 S_{river} が算定でき、 R 及び Q_{out} も既知量である。しかし、洪水水面形が測られていない山地斜面、本川上流域や、支川流域では、貯留量は算定不可能であり、この値は、流域貯留量 S_{basin} として既知の量から式(2)を用いて一括して計算される。

大河川流域では、これまで行ってきた河川の観測水位を用いた水面形の時間変化から求める流域水収支図では、河川上流域の本・支川の洪水水面形が測られていない河川区間は長く、特に支川群で二次支川、三次支川での水位観測はほとんど行われていない。図 - 1に示すようにこれら支川群流域面積の全流域面積に占める割合は著しく大きく、このため、 S_{basin} も著しく大きくなり、流域水収支図の S_{basin} の持つ物理的意味があいまいであり、このままでは、流域治水における流域水収支図の果たす役割り、有効性は小さい。

以下に、流域水収支図における流域貯留量 S_{basin} を算定する解析方法を提示する。これにより式(1)、(2)を用いて対象流域の流域水収支分布の信頼性を高め、流域治水への流域水収支図の活用を図る。



$$\underbrace{\frac{1}{3.6} A \cdot r}_{\text{流域降雨量}} - \underbrace{Q_{out}}_{\text{流末流量}} = \underbrace{\frac{dS_{basin}}{dt}}_{\text{ダム貯留量の時間変化}} + \underbrace{\frac{dS_{dam}}{dt}}_{\text{河道貯留量の時間変化}} + \underbrace{\frac{dS_{river}}{dt}}_{\text{ダム貯留量の時間変化}}$$

A :流域面積(km^2), r :降雨量(mm/hr), Q_{out} :流末からの流出量(m^3/s)

3. 石狩川支川豊平川流域の水収支図の作成

3.1 山腹斜面の貯留量を求めるための解析の考え方

Step ① 流域において右図の**赤で示す河道区間**において観測水面形を用いた平面二次元洪水流解析を行い河道上流端の流量ハイドログラフを求める

必要な情報

- ✓ 河道の観測水面形時系列
- ✓ 縦横断地形

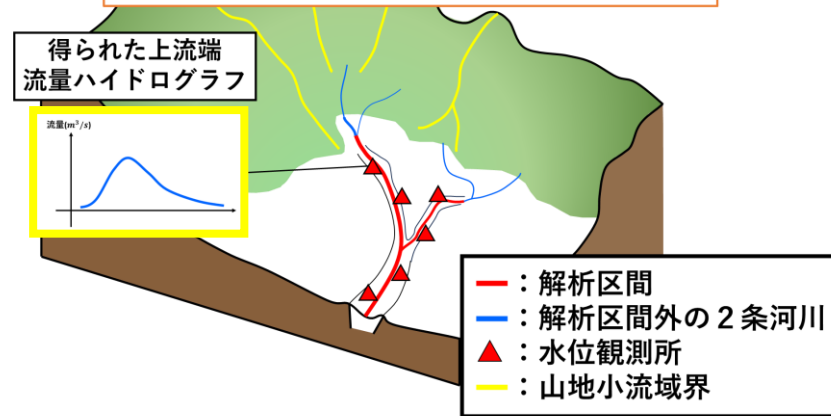
Step ② 流域において右図の**赤線**で示す河道の上流につながる**青線で示す平水時に5m以上の溝部（2条河川）上流域や山腹斜面**の分布を調べ、右図**橙色**に示す小流域群に分割する。そして小流域をタンクモデルで表し、小流域に降る豪雨時の流出のハイドログラフを小流域ごとに得る。

必要な情報

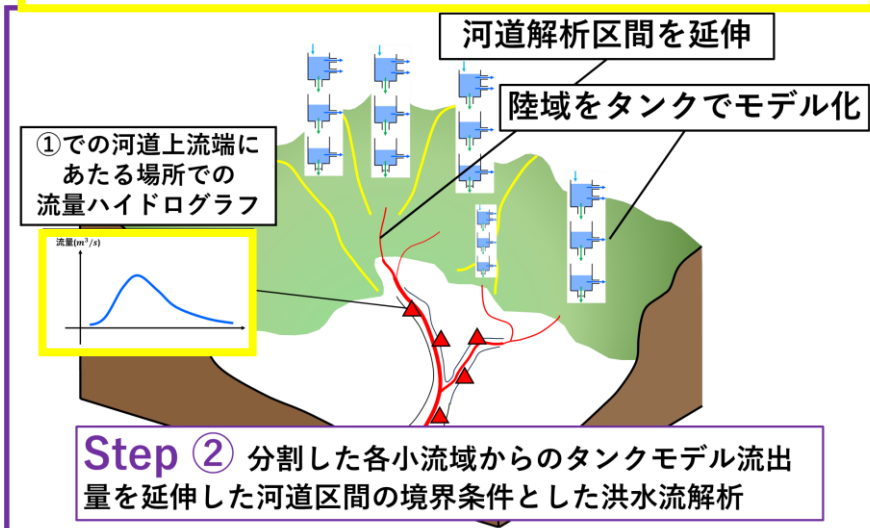
- ✓ 降雨の時空間データ
- ✓ ①で求めた河道上流端の流量ハイドログラフ

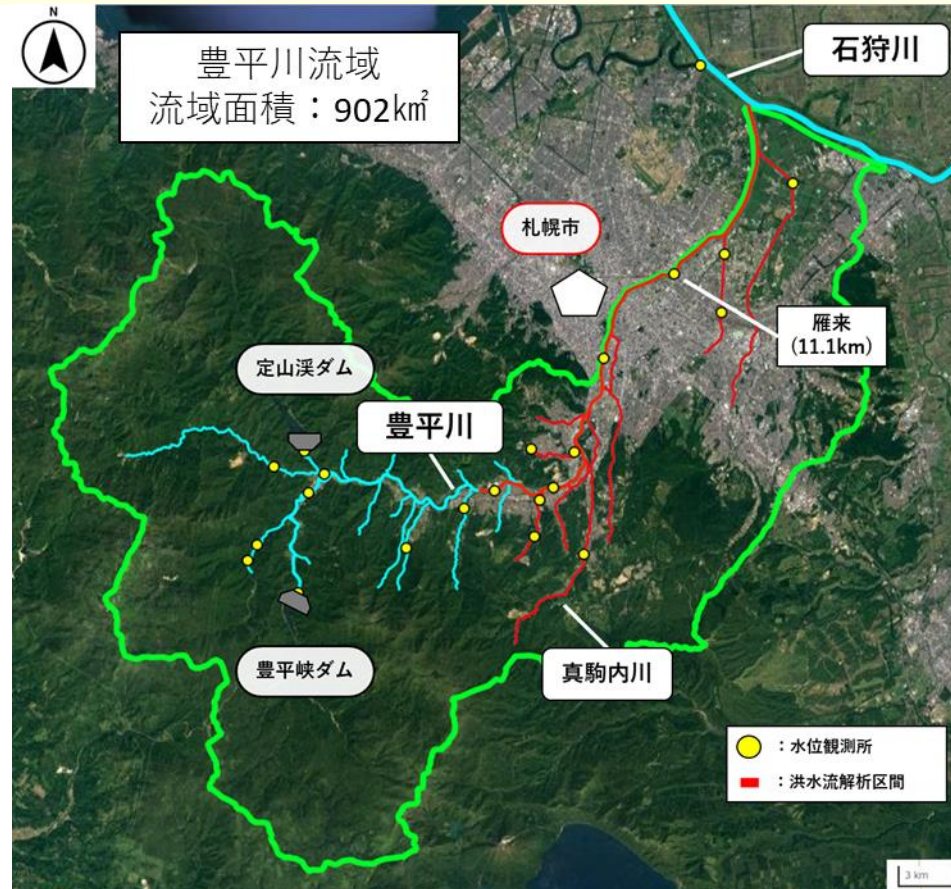
③ ②で求めた各小流域から合成された洪水流出ハイドログラフが①で算出された洪水流のハイドログラフに合うように小流域群のタンクの係数を調整する。このようにしてタンクモデルから求めた流出ハイドログラフを合成し河道上流端に流入させる。

Step ① 観測水面形に基づいた洪水流解析

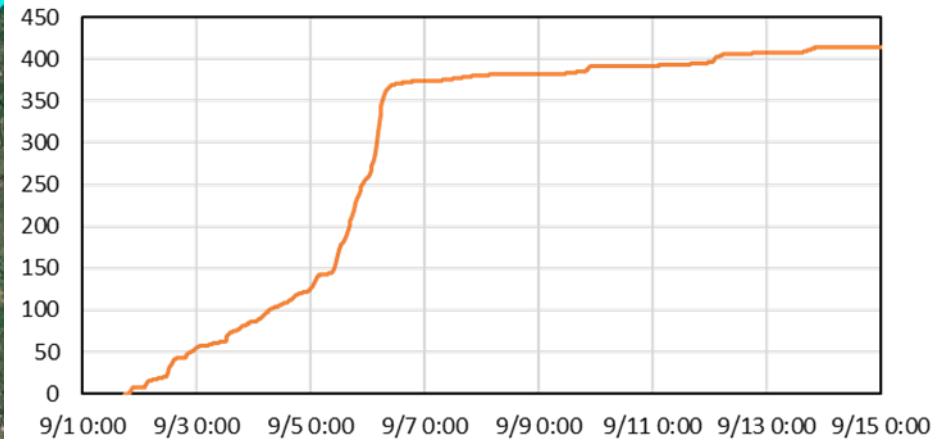


Step①で得られた流量ハイドログラフが、
Step②で得られた流量ハイドログラフに
整合するようにタンクモデルパラメータを調整する

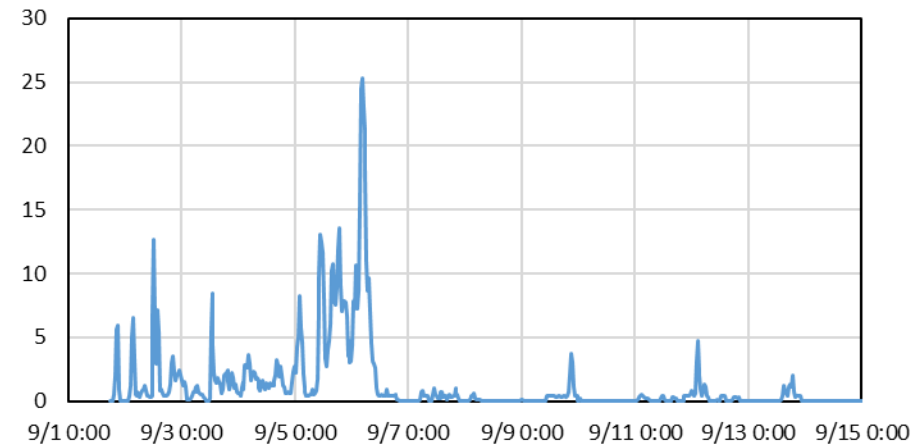




総雨量(mm) H23洪水時の累加雨量



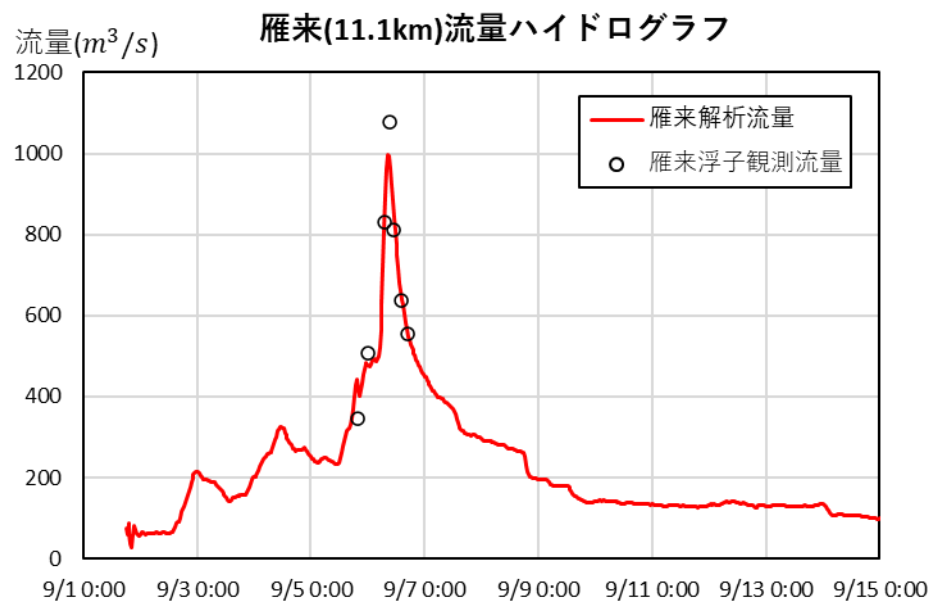
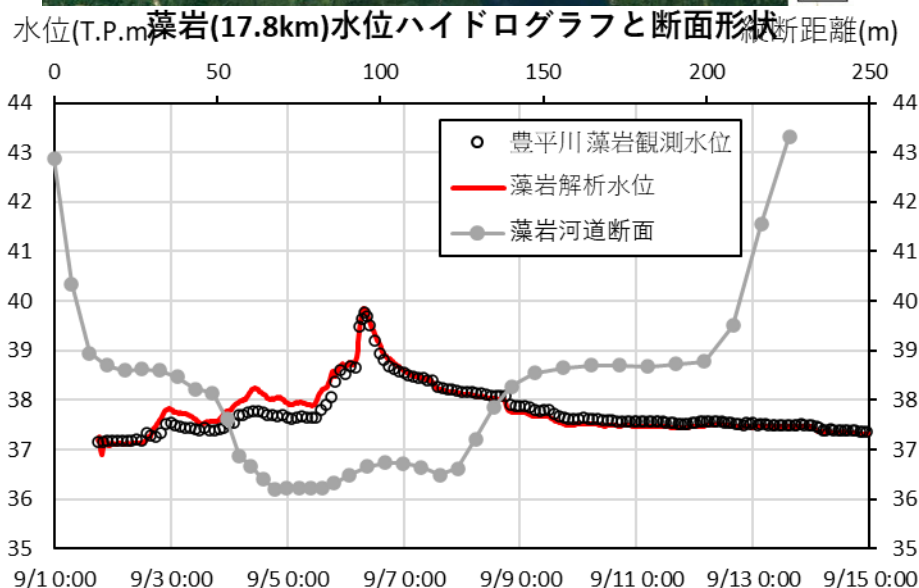
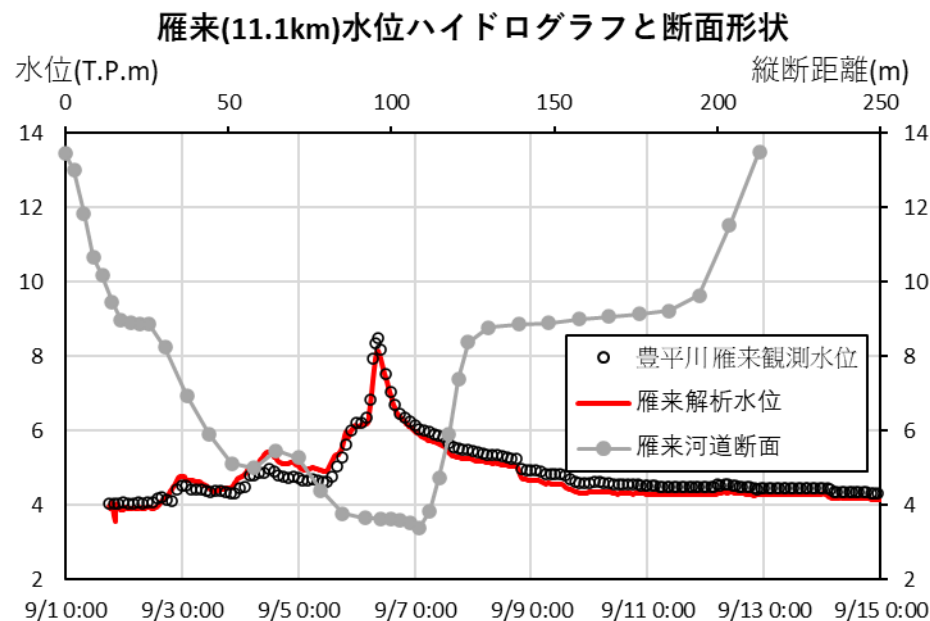
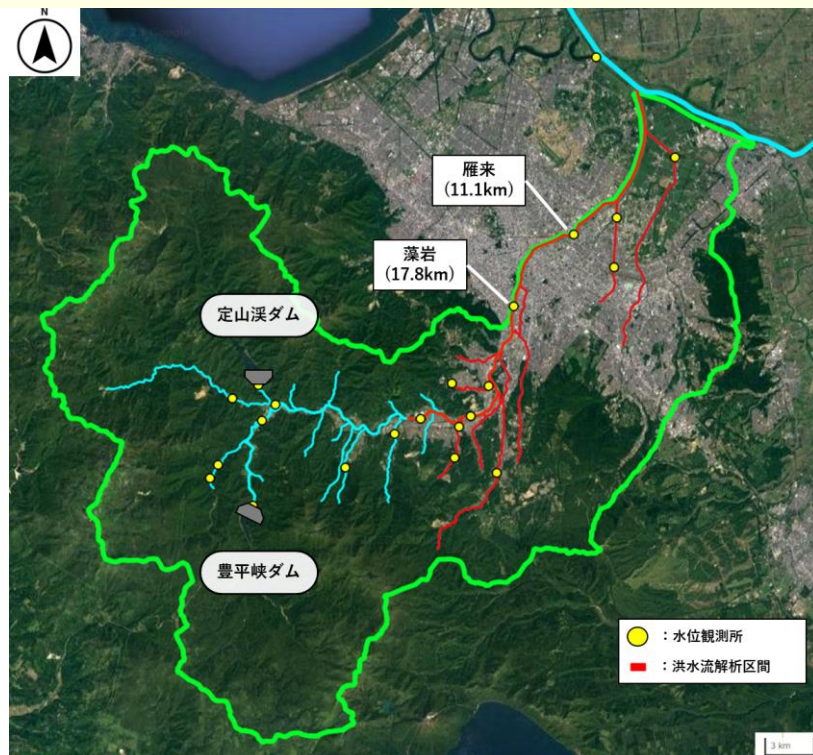
雨量強度(mm/hr) H23洪水時の流域平均雨量

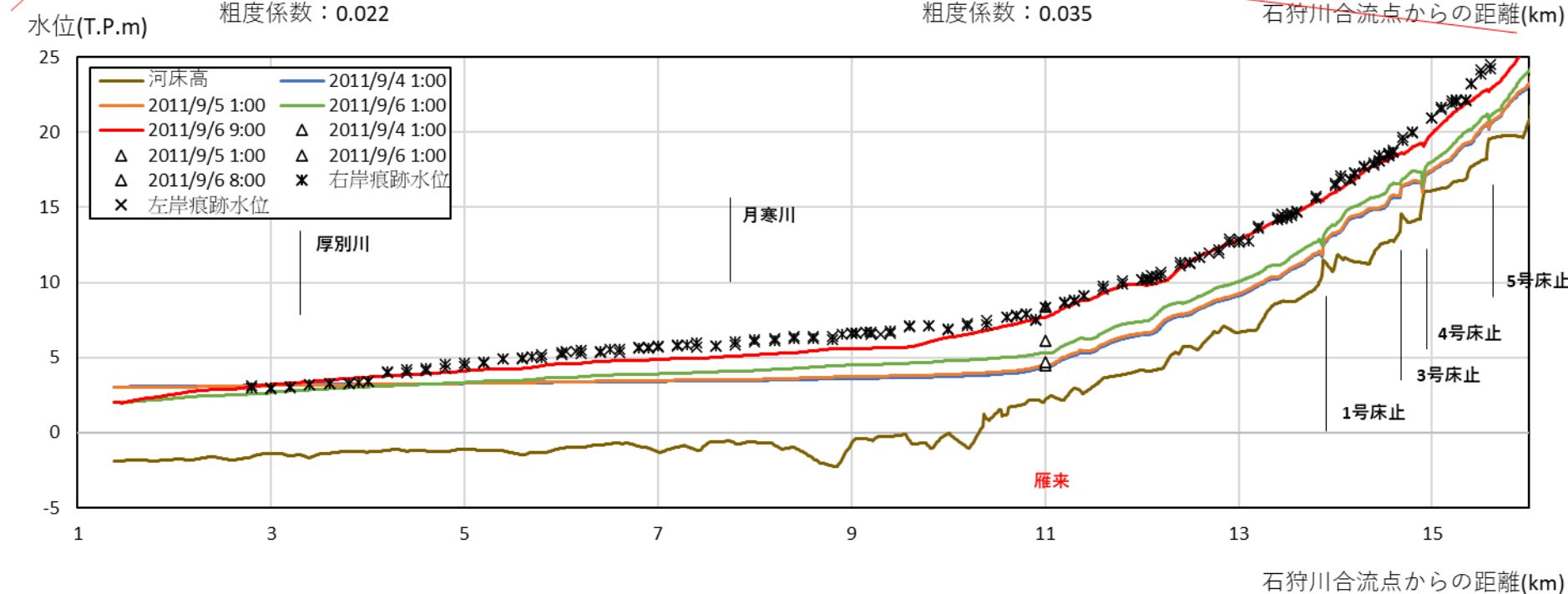
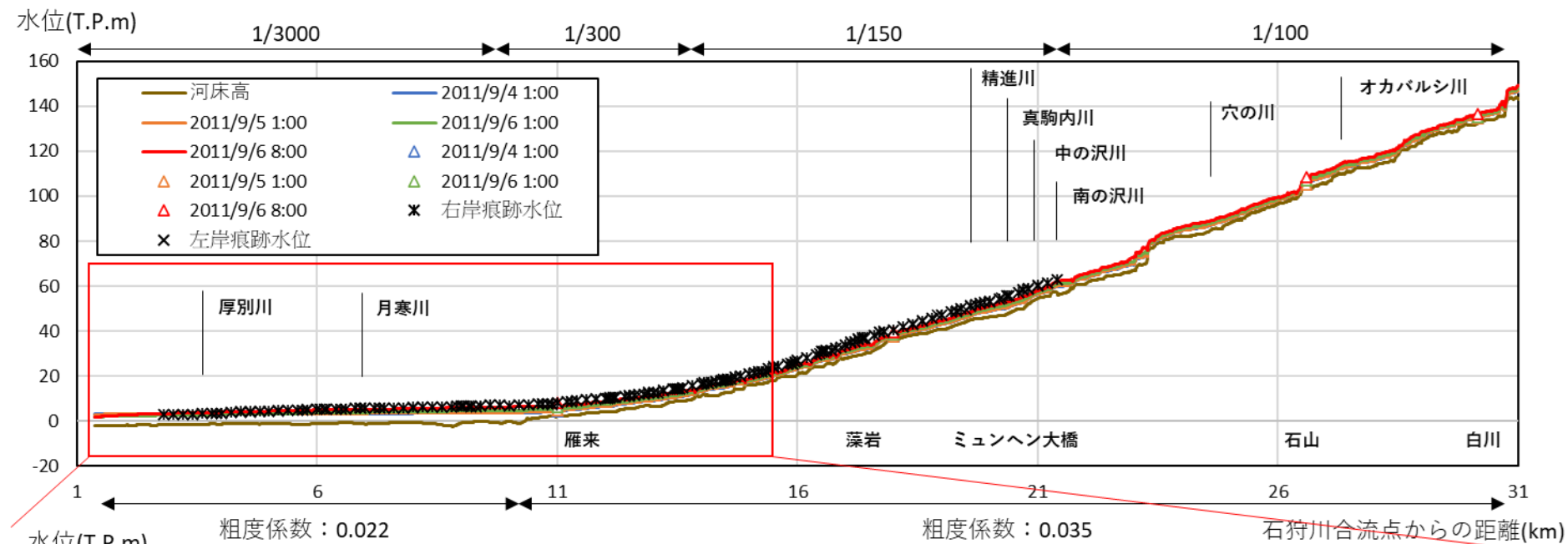


洪水水面形の解析条件

解析期間	H23年9月1日18時～15日0時
上流端境界条件 (水位)	白川観測水位 (30.1km)
下流端境界条件 (水位)	篠路 (石狩川との合流点で与える)
支川の解析条件	観測水位を用いて一体解析 (穴の川・精進川はタンクモデル流量を用いて解析)

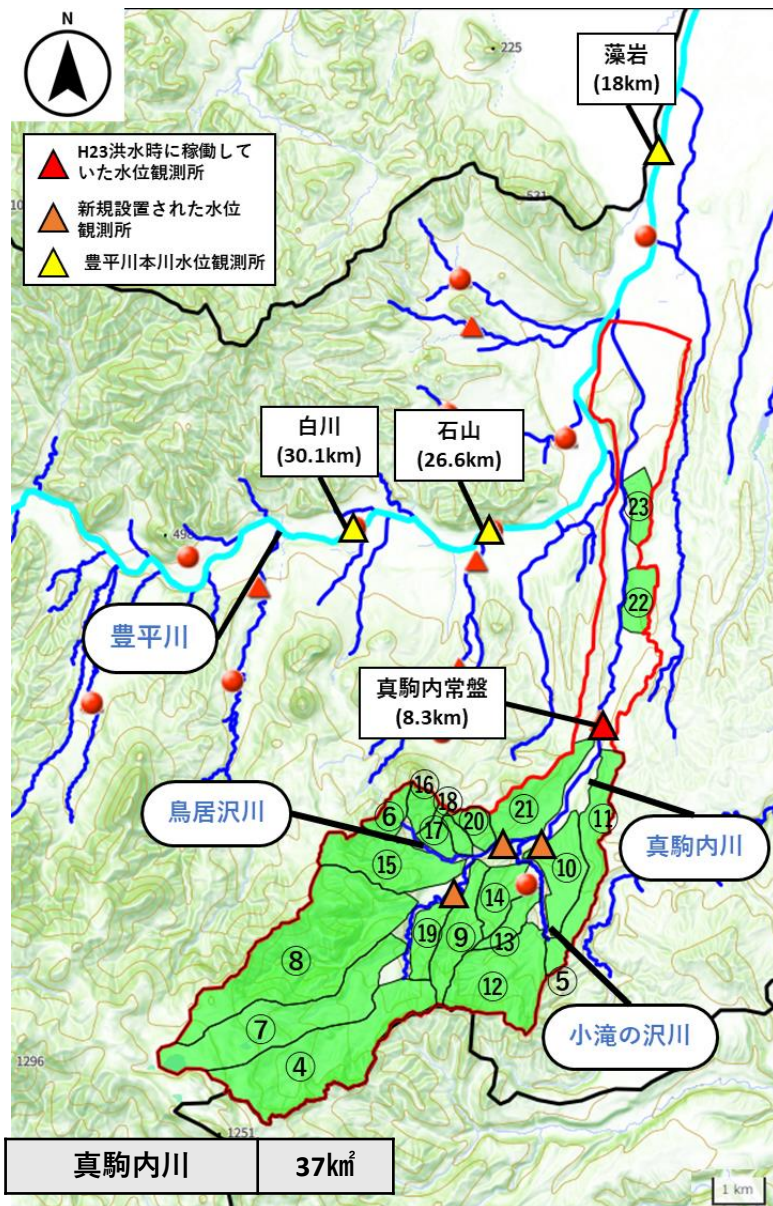
水面形の解析結果(豊平川：水位・流量ハイドログラフの比較) | 4



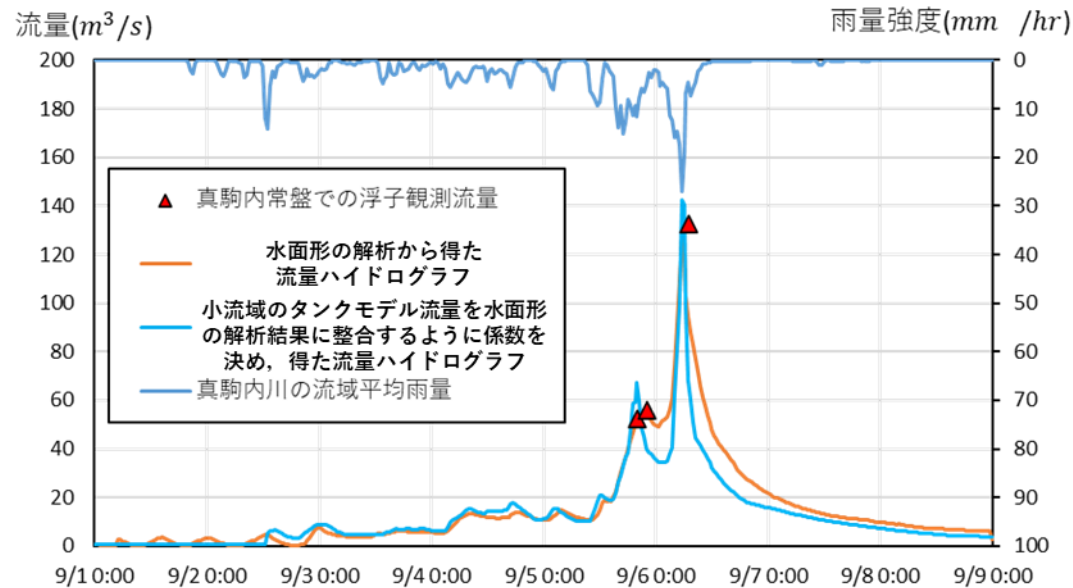


豊平川の支川でのタンクモデル流出量を用いた解析(step②)

16



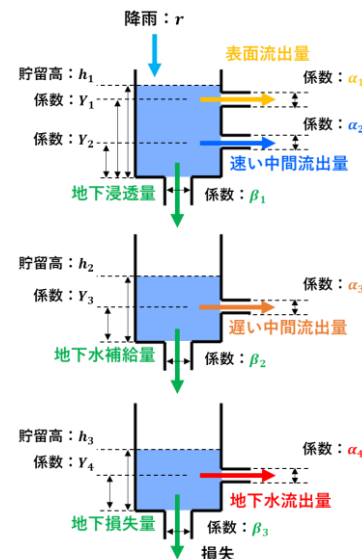
真駒内常盤地点での流量ハイドログラフの比較



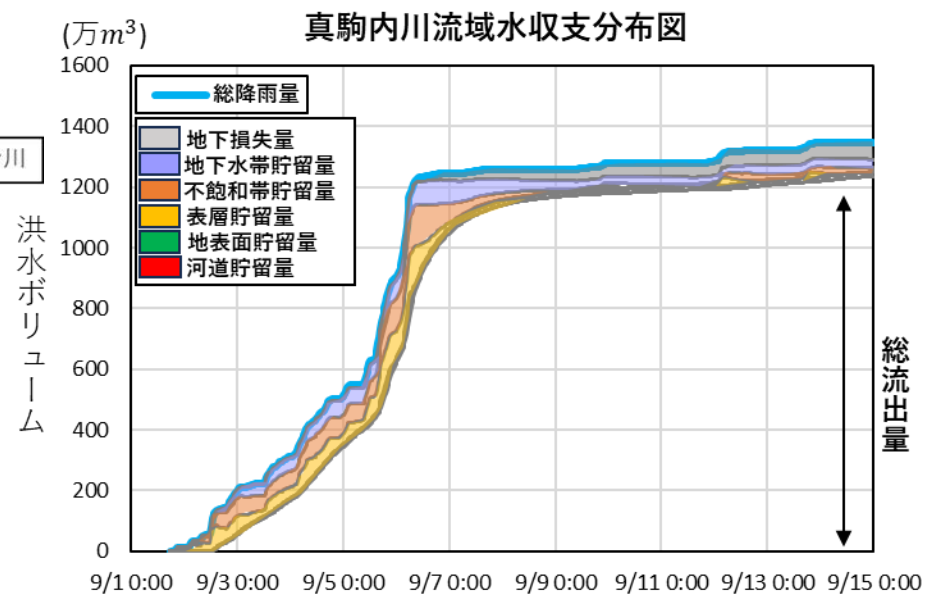
真駒内川 流域面積(km²)

④	4.22
⑤	0.23
⑥	0.56
⑦	3.79
⑧	5.10
⑨	1.39
⑩	1.45
⑪	2.41
⑫	0.59
⑬	0.94
⑭	1.96
⑮	0.56
⑯	0.43
⑰	0.05
⑱	0.67
⑲	0.54
⑳	1.55
㉑	1.65
㉒	1.55
㉓	0.57

平均値 1.51



係数	真駒内
α1	0.8
α2	0.15
α3	0.08
α4	0.03
Y1	35
Y2	9
Y3	5
Y4	5
β1	0.12
β2	0.04
β3	0.005



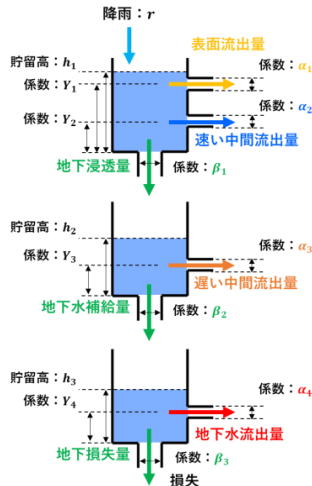
	流域面積		流域面積
簾舞川	24km ²	オカバルシ川	8km ²
真駒内川	37km ²	南の沢川	10km ²

分割された小流域をタンクモデルで計算した流量を用い、 豊平川洪水流解析(ステップ②)

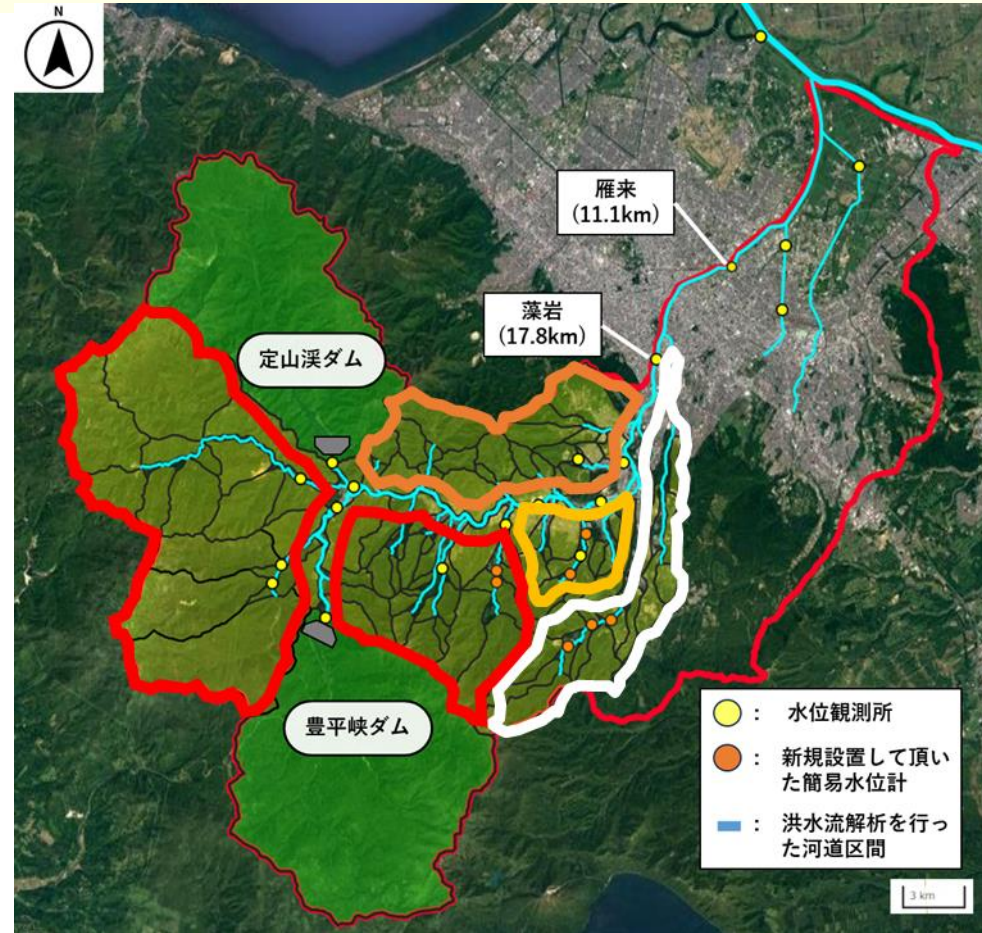
18

タンクモデルパラメータと使用する流域について

南の沢川で求めたパラメータ	オレンジ枠内の流域に適用
真駒内川で求めたパラメータ	白枠内の流域に適用
オカバルシ川で求めたパラメータ	黄色枠内の流域に適用
簾舞川で求めたパラメータ	赤枠内の流域に適用



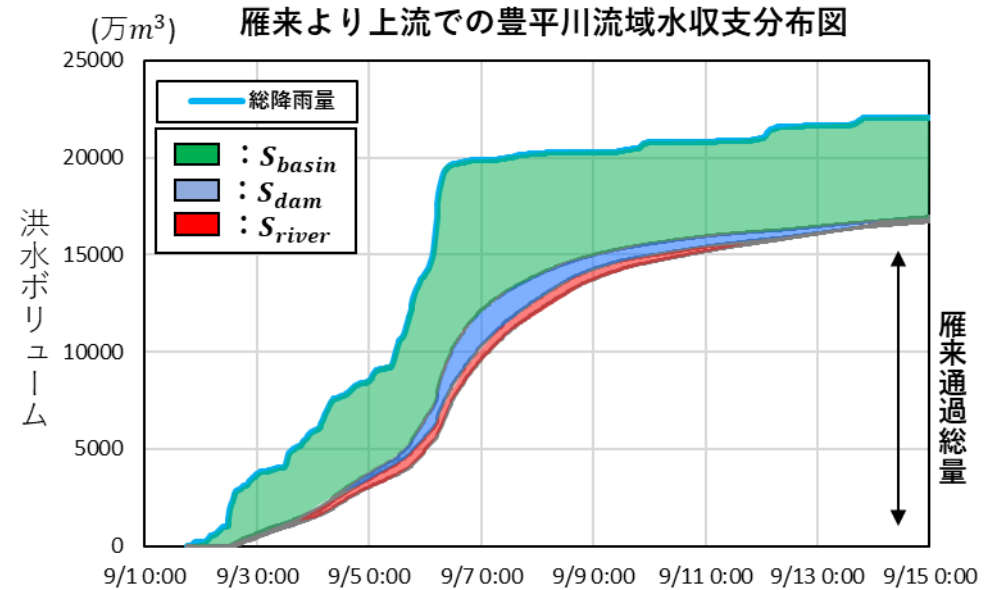
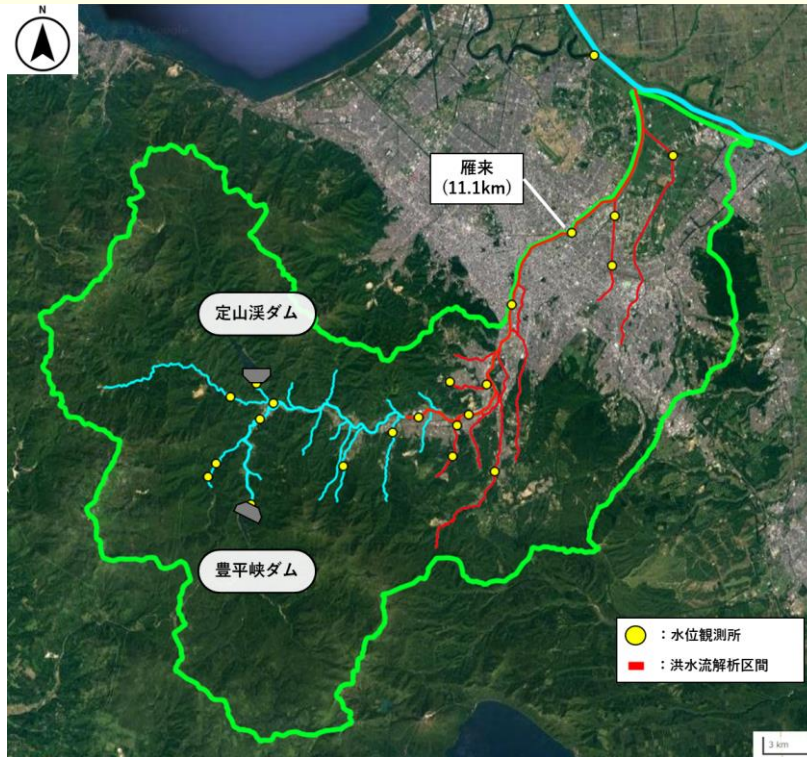
係数	南の沢川	真駒内川	オカバルシ川	簾舞川
$\alpha 1$	0.2	0.8	0.15	0.8
$\alpha 2$	0.12	0.15	0.13	0.09
$\alpha 3$	0.08	0.08	0.08	0.05
$\alpha 4$	0.03	0.03	0.03	0.01
$Y 1$	24	35	40	36
$Y 2$	10	9	8	8
$Y 3$	10	5	10	15
$Y 4$	0	5	5	15
$\beta 1$	0.2	0.12	0.2	0.26
$\beta 2$	0.04	0.04	0.02	0.08
$\beta 3$	0.005	0.005	0.02	0.005



計算条件

解析期間	H23年9月1日18時～15日0時
下流端境界条件 (水位)	篠路 (石狩川との合流点で与える)
小流域の分割	各山腹斜面・豊平川沿いの残留域から なる計 108 個に分割 (流域面積の平均値は 2.34km²)

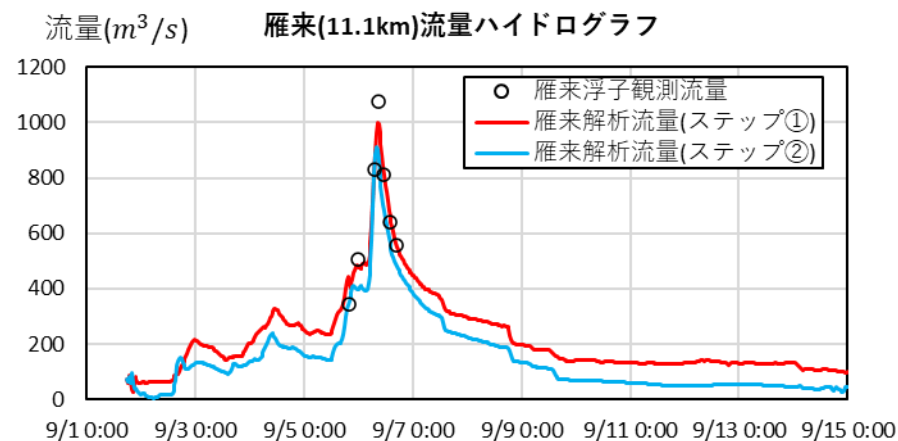
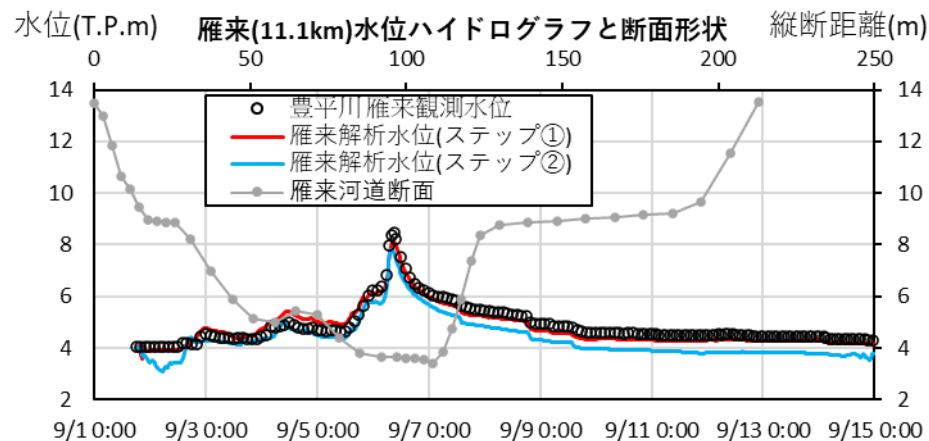
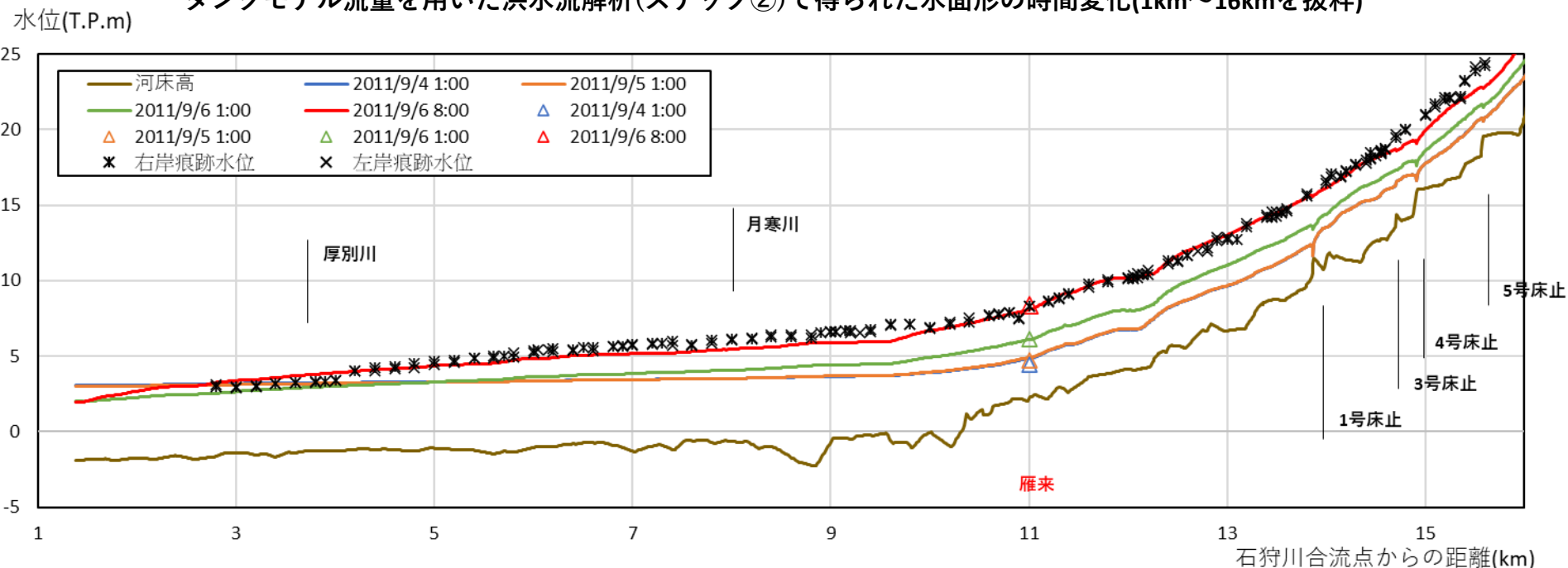
step2で求めたタンクモデル流量ハイドログラフを各支川の上流端境界条件として 河道の水面形を解析し， 豊平川流域全体の水収支図を作る

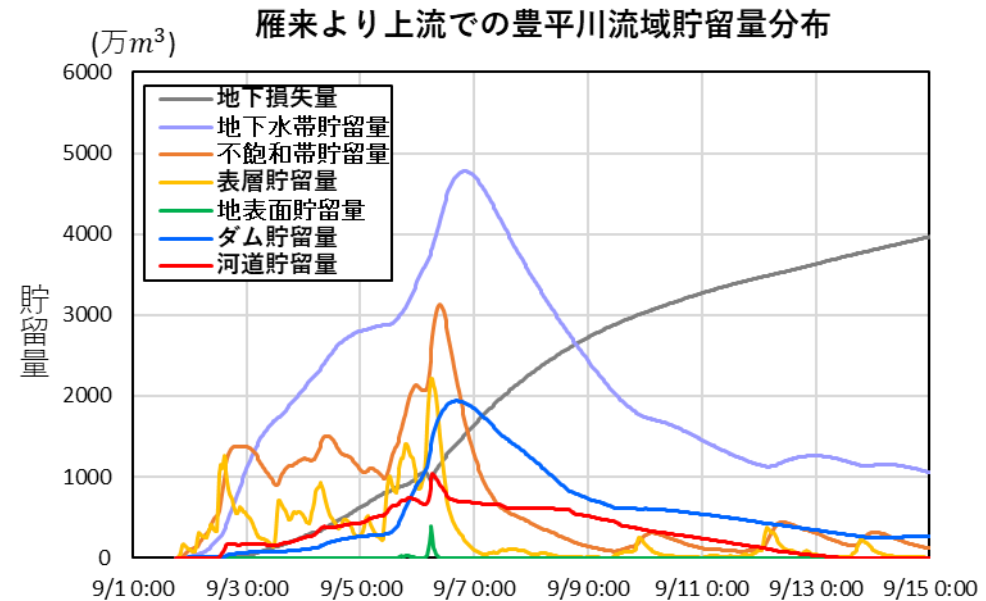
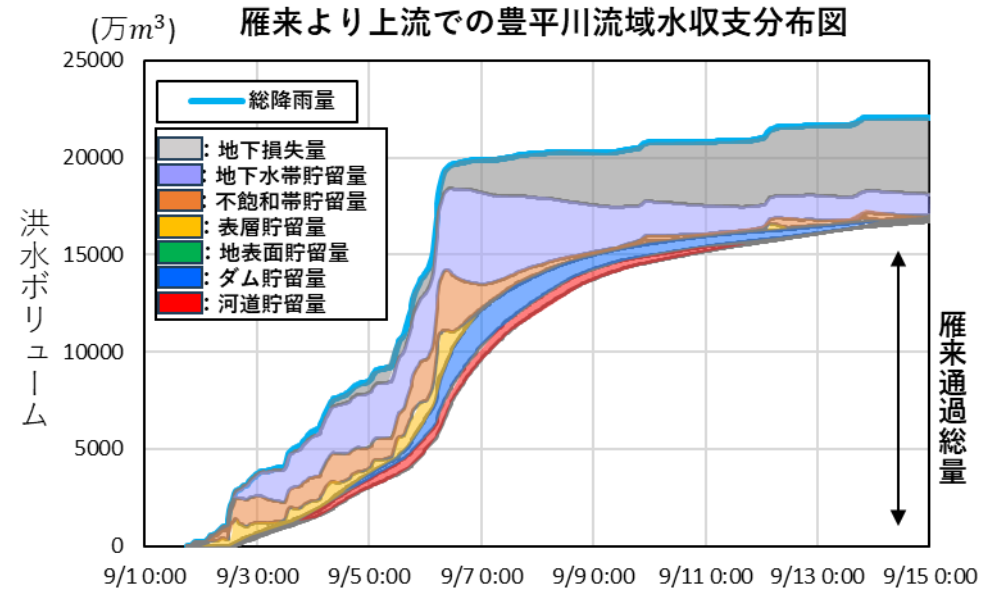
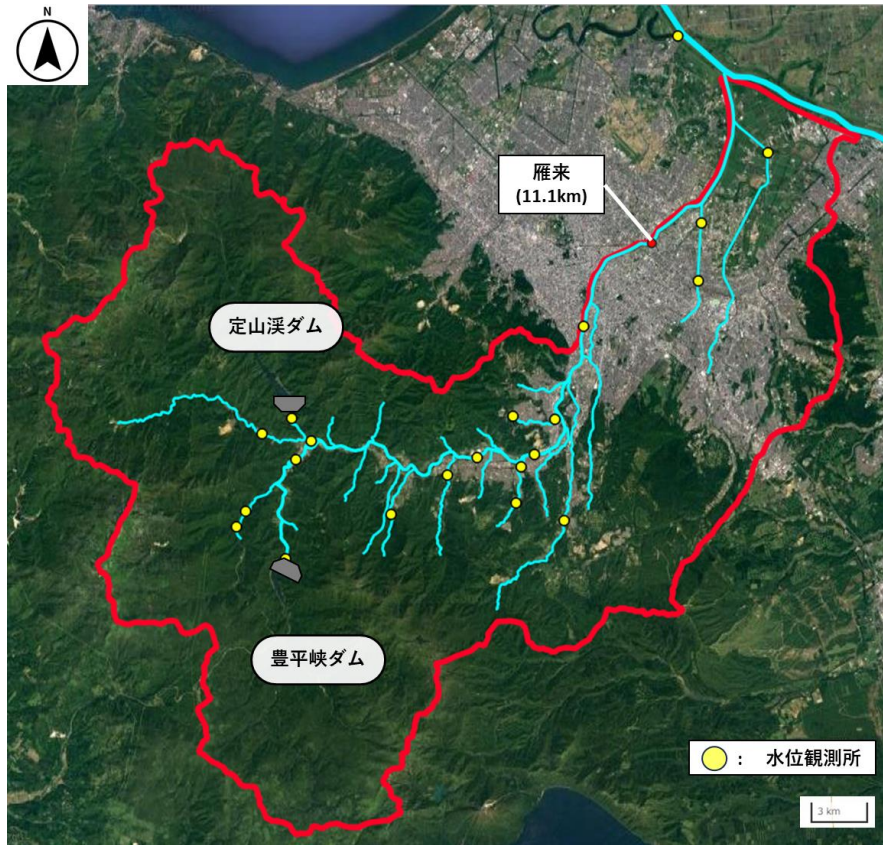


$$\underbrace{\frac{1}{3.6} A \cdot r}_{\text{流域降雨量}} - \underbrace{Q_{out}}_{\text{流末流量}} = \underbrace{\frac{dS_{basin}}{dt}}_{\text{ダム貯留量の時間変化}} + \underbrace{\frac{dS_{dam}}{dt}}_{\text{河道貯留量の時間変化}} + \underbrace{\frac{dS_{river}}{dt}}_{\text{ダム貯留量の時間変化}}$$

A :流域面積(km^2), r :降雨量(mm/hr), Q_{out} :流末からの流出量(m^3/s)

タンクモデル流量を用いた洪水流解析(ステップ②)で得られた水面形の時間変化(1km～16kmを抜粋)





流域水収支図の活用にあたっては、それぞれの流域や河道の状況に応じて流域治水対策として取り込み、洪水流解析を行い、その対策の効果を流域水収支分布上で見える化するのが次の課題となる。

これについては、次の人吉市での内水氾濫被害に対する避難と、まちづくりで検討する。

4. 人吉市街地内水氾濫解析法の構築と 避難・減災まちづくりへの活用

4-1. 対象地域と令和2年7月豪雨の特徴

対象地域（人吉市街地：約10km²）の特徴

- ・ 標高の最も低い南西部に向かい雨水が集まりやすい。
- ・ 市内には水路網が張り巡らされており、農業水路等の既存施設を活用しながら、雨水を排水する。

令和2年7月豪雨の人吉市街地における降雨の特徴

60～70(mm/h)の高強度降雨が市内を襲い、肥薩線より北部で南部市街地に比べて最大で70mm程多くの雨が集中する。累加雨量は、降り始めから外水氾濫発生前までの約1日で約280mmに達する。

図-2:人吉市街地の概要（Google Earthに加筆）

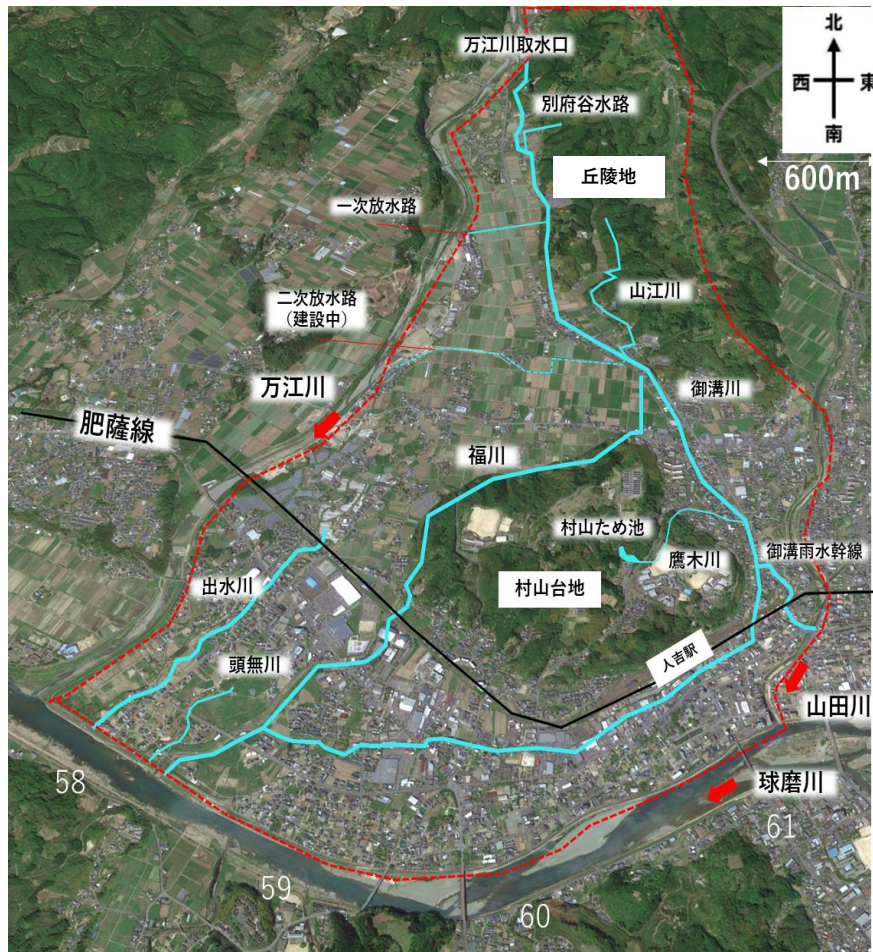
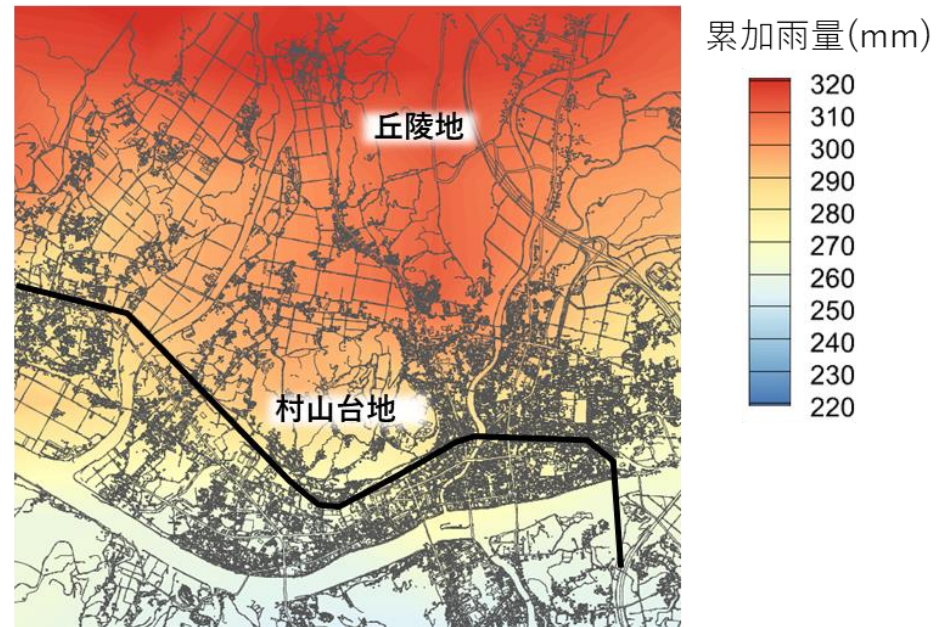
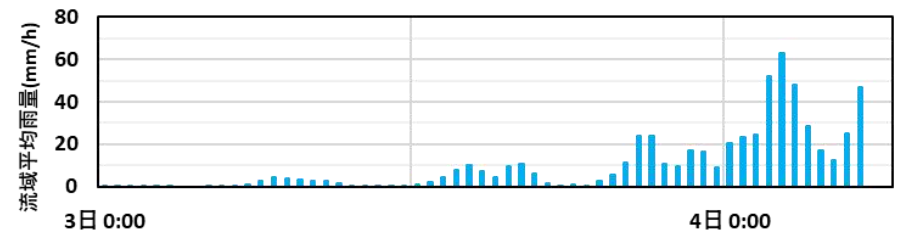


図-3:人吉市街地の概要（Google Earthに加筆）

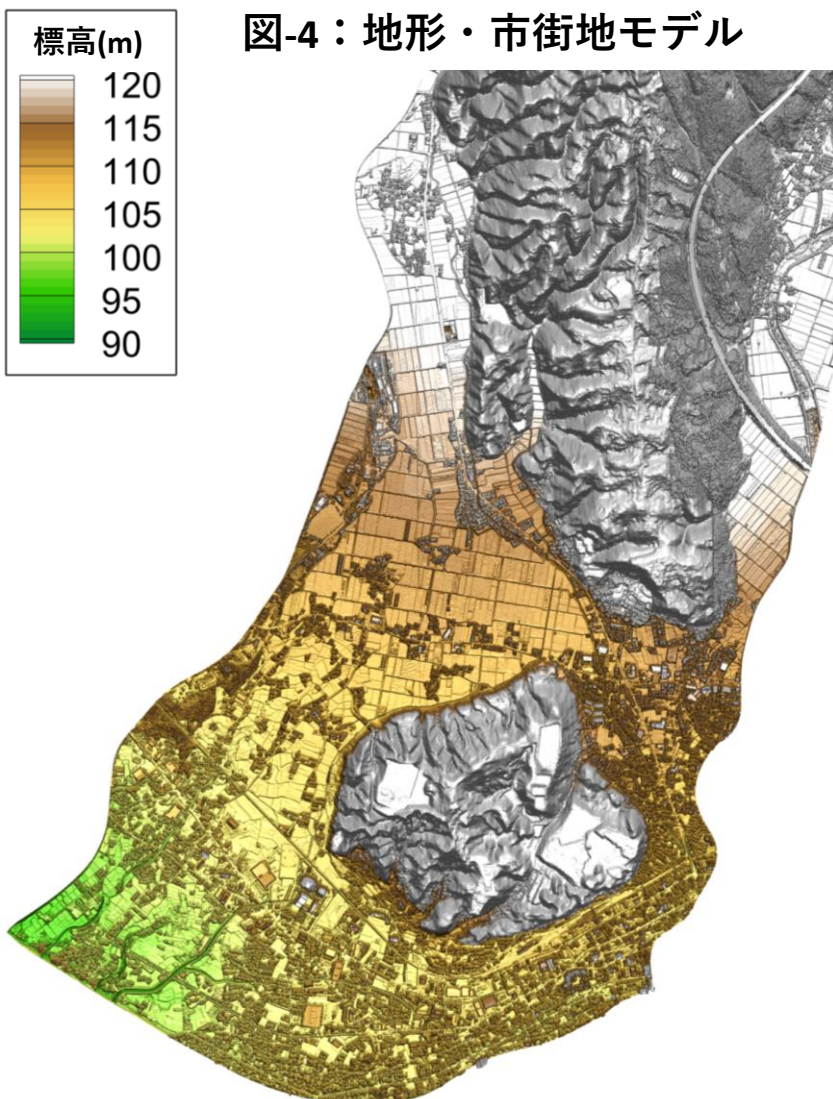
令和2年7月豪雨(外水氾濫発生前4日5時まで)



内水氾濫解析 (2D Inundation Model for Evacuation and Community planning : 2D-IMEC)では、**台地や丘陵地の降雨流出、水路網の流れ、氾濫についてを平面二次元不定流解析法**を全流域に適用する。

降雨は、p6の図-3の**気象庁レーダー解析雨量(1時間30分毎のデータ)**を用いて市街地を25分割し、**時空間分布を考慮した**。地形・市街地モデルは、L.P.オリジナルデータ及び河道データ等を基に、**解像度2mのメッシュ**で水路網・住宅群・道路網を詳細に再現している(図-4)。

図-4：地形・市街地モデル



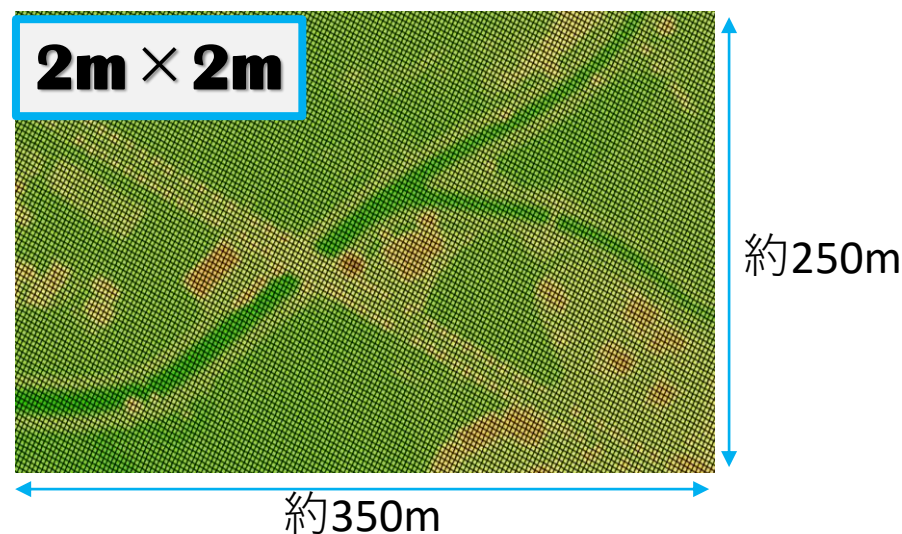
平面二次元不定流解析法(一般座標系)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial U_j h}{\partial x_j} = r_k$$

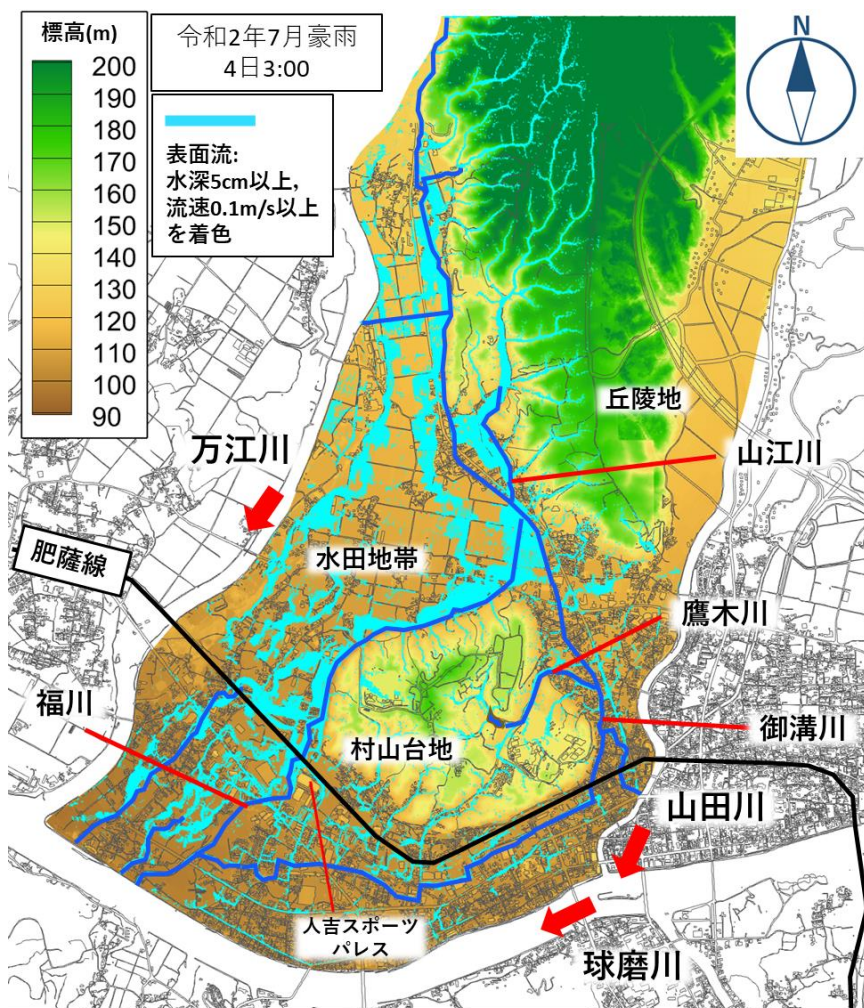
$$\frac{\partial U_i h}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j h}{\partial x_j} = -gh \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - \frac{\tau_{bi}}{\rho}$$

$i, j : 1, 2$, $k : 1 \sim 25$, $x_i : x, y$, h : 水深, t : 時間, $U_i : x_i$ 方向の水深平均流速, r_k : 領域 k 内の雨量, g : 重力加速度, z_s : 基準面からの水位, τ_{bi} : x_i 軸方向の底面せん断力, ρ : 水の密度

格子サイズ



4-2. 詳細内水氾濫解析法(2D-IMEC)



2D Inundation analysis

地形・市街地モデルの作成

①低地

県管理の河川や下水道には断面データ,
その他の水路や道路網, 建物群にはL.Pオリジナルデータ
(30cm間隔)を用いる.

②丘陵地・台地

L.P.グラウンドデータ(5m間隔)を用いる.

2mの解析格子を用いて, ①, ②のデータを基に
地形・市街地モデルを作成する.

上流端境界条件

気象庁のレーダー解析雨量(1km間隔30分毎)のデータ
を与える

下流端境界条件(球磨川, 万江川, 山田川)
水面形に基づく洪水流解析により得られる
外水位を与える



内水氾濫の浸水深の時空間分布を算出

図-3: 令和2年7月豪雨の詳細解析の結果
(人吉市街地の4日3時の雨水の流れ)

4-3. 令和2年7月豪雨時の人吉市街地の内水氾濫機構の分析

人吉市街地の降雨流出過程

- ・ 令和2年7月豪雨では北部での降雨の集中により、水田地帯や丘陵地から多くの雨水が下流の市街地へ流下する。（図-5）
- ・ 市内を縦横に流れる御溝川では、台地や丘陵地から流れ出る鷹木川及び山江川との合流により、急激に流量が増大する（図-6）。

図-5：人吉市街地の雨水の流れ（4日3時解析結果）

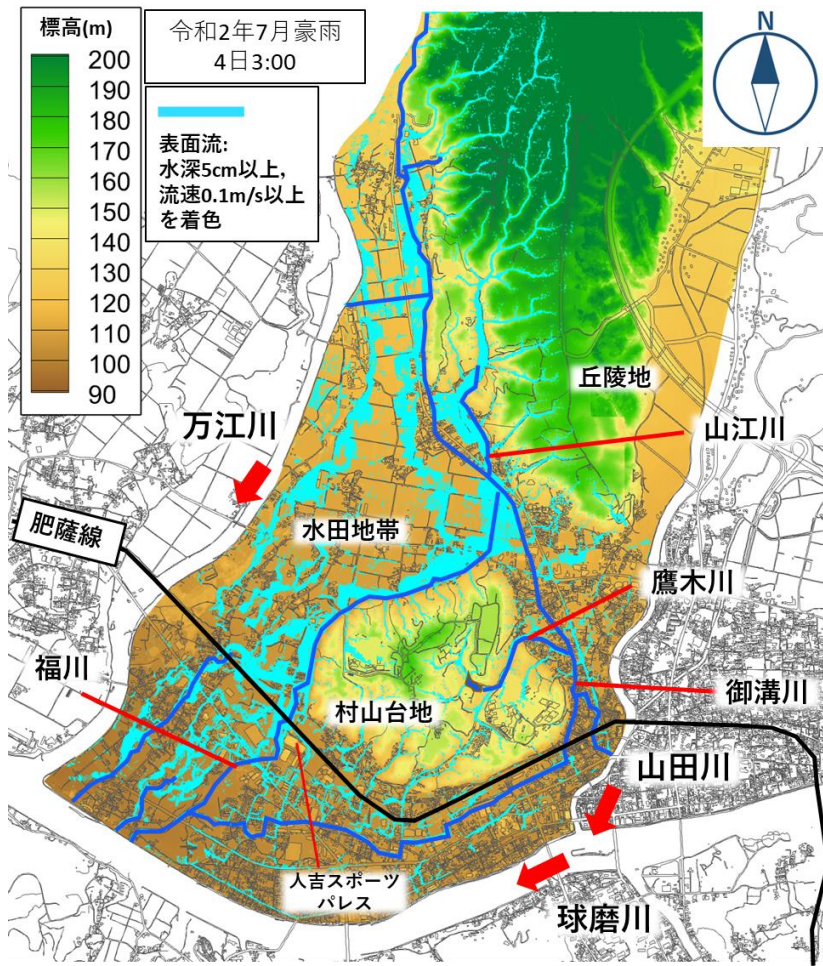
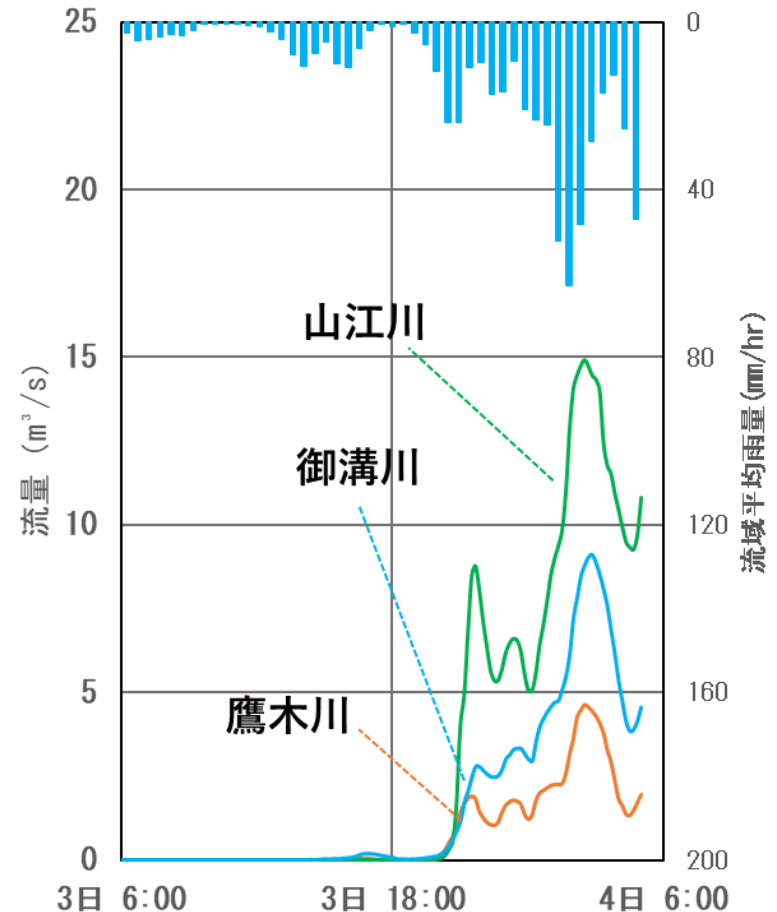


図-6：丘陵地等から続く支流と御溝川の流量ハイドログラフ



4-3. 令和2年7月豪雨時の人吉市街地の内水氾濫機構の分析 市街地の浸水状況

29

人吉スポーツパレスに向かう幹線避難路では、福川や御溝川からの氾濫水や雨水が集水され、急激に水位が上昇している。4日3時の深夜では浸水深1m程となり、避難困難な状況となっている（図-7～9）。

図-7：幹線避難路の冠水水面形

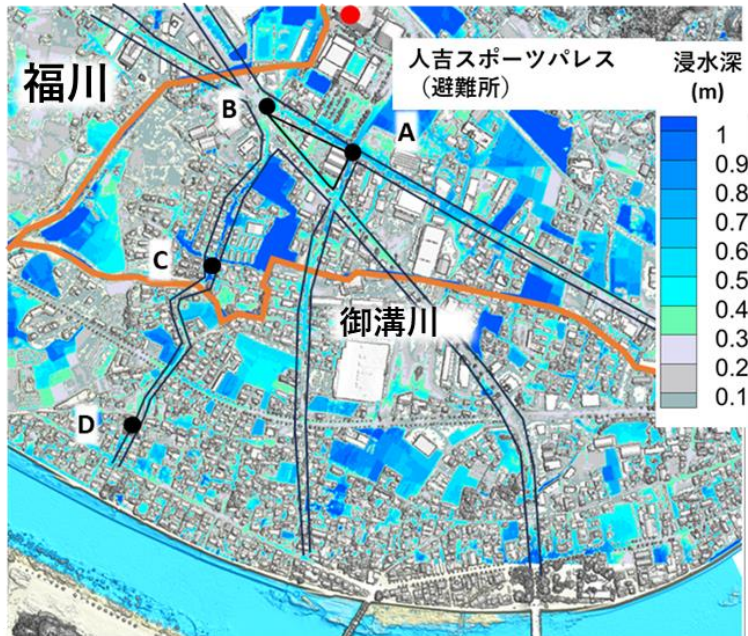
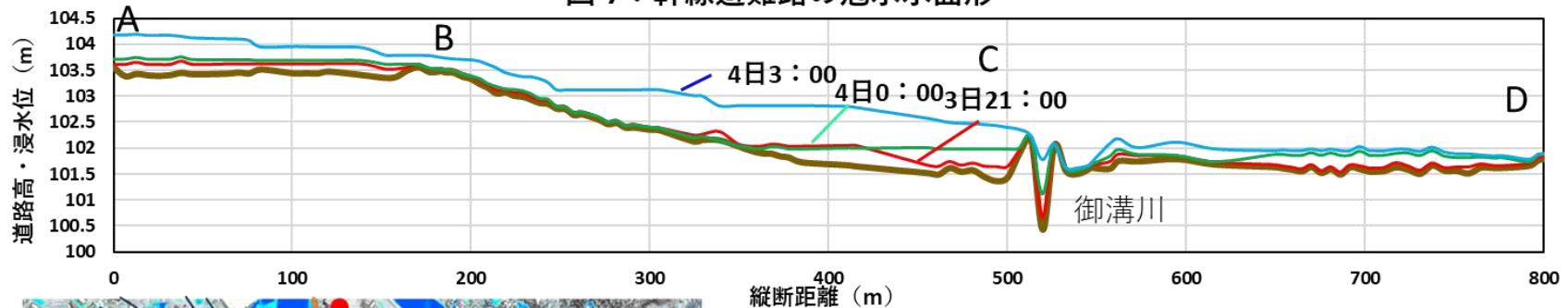
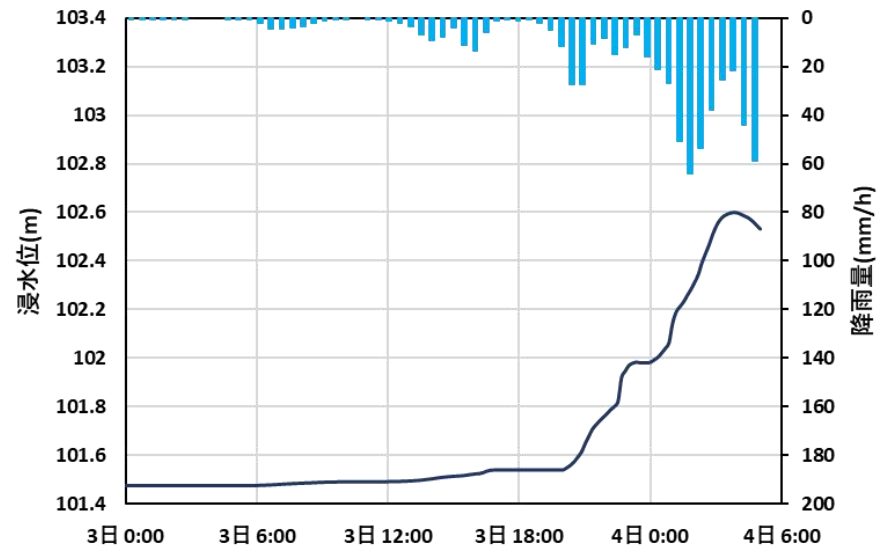


図-8：4日3時の浸水深コンター（解析結果）

図-9：幹線避難路 c点 浸水位ハイドログラフ

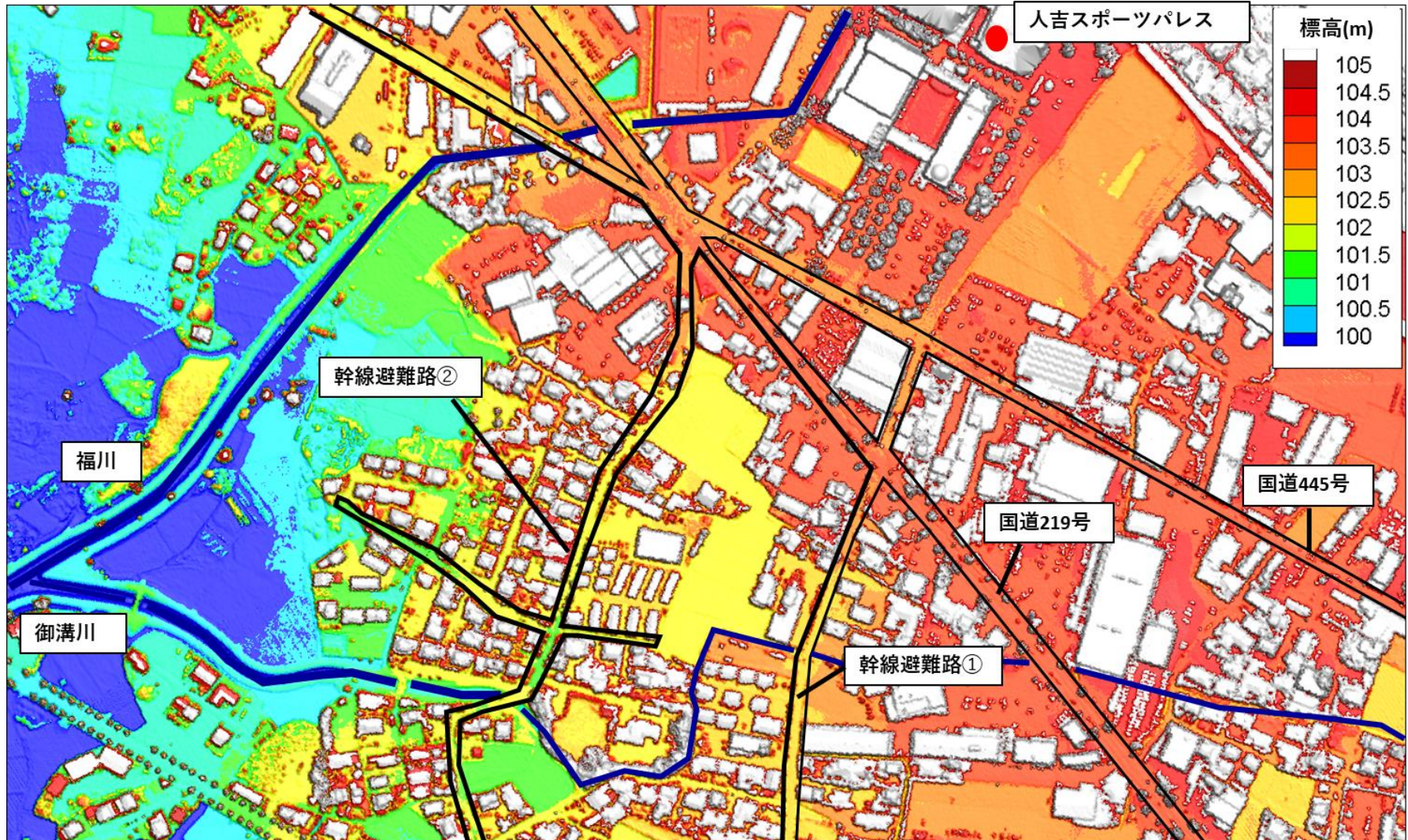


4-3. 令和2年7月豪雨時の人吉市街地の内水氾濫機構の分析 30

市街地の浸水状況

図-10は、人吉スポーツパレス(避難所)周辺の標高コンター(平成18年LIDARデータ)を示している。人吉スポーツパレスに向かうための避難路に着目すると、避難路の地盤高は周囲に比べて低く、小河川の氾濫流や雨水が集水されやすい地形特性となっている。

図-10:人吉スポーツパレス周辺の標高コンター



4-3. 令和2年7月豪雨時の人吉市街地の内水氾濫機構の分析

市街地の浸水状況

31

北部に位置する水田水位と畦畔の高さ関係に着目すると4日0時には水田が満水状態になり、流出を開始する（図-11,12）。そして、出水川では4日0時半頃から急激に水位が上昇し、3時には浸水深70cmを超え、歩行避難の難しい状況となった。下林町における出水川の氾濫には北部水田からの豪雨流出が大きく影響していることが分かる。

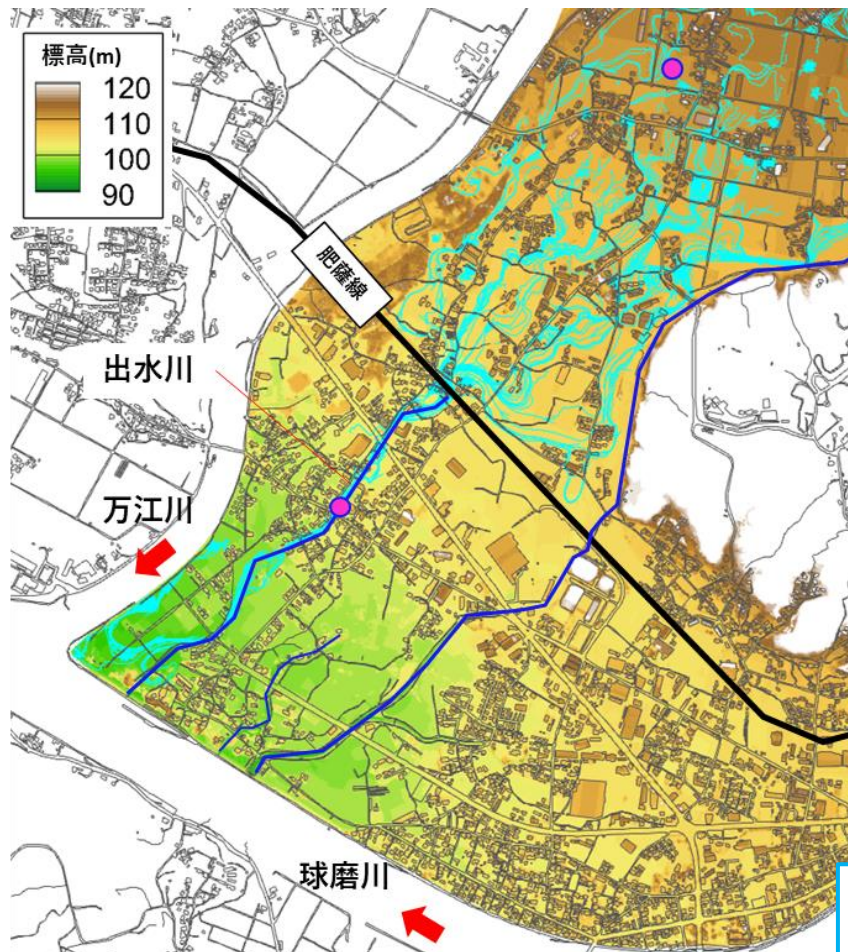


図-11:北部水田からの雨水の流れ（4日3時）

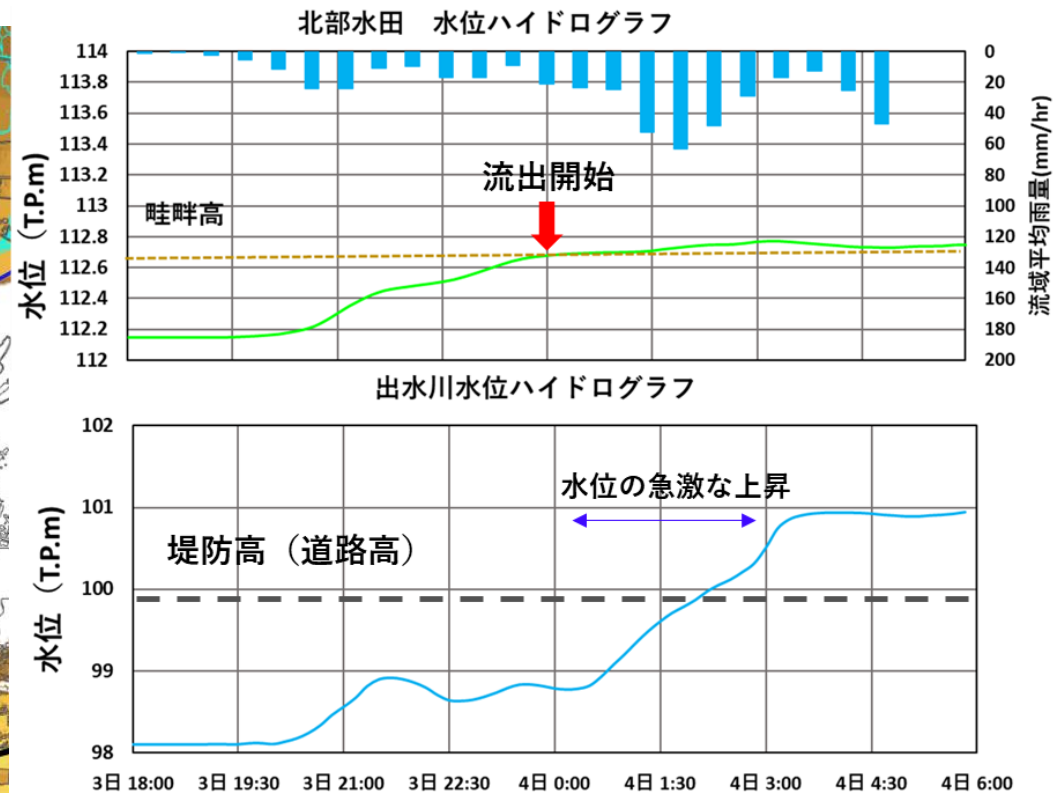


図-12:水田と出水川水位の関係

令和2年7月豪雨時、人吉市では北部に降雨が集中し、水田や丘陵地等から多くの雨水が市街地を流れる水路へ流れ込むことで外水氾濫前の早い時間帯で内水氾濫が生じ、避難の難しい状況となった。

4-4. 市街地の流域水収支分布図の構築

水収支分布の算定式

以下に、市街地における水収支分布の算定式を示す。

市街地に降った雨の量と各樋門・樋管の排水量の差から各時間で市街地に存在する水量の時間変化が分かる。また、氾濫解析により時空間的な水深分布を得ることで、**降った雨が丘陵地や台地、水田、水路網、低地のどこに、どんな量の水がどの様に存在しているのか**が求まる。

これにより、各市街地における水収支分布を知ることができ、**内水氾濫現象の見える化**が可能となる。

更に、河道や流域における対策前後で流域水収支分布図を比較することで、対策に伴う水収支分布の時空間的な変化を知ることが出来る。

水収支分布の算定式

$$\frac{dS_{urban}}{dt} = \frac{dS_{plateau}}{dt} + \frac{dS_{paddyfield}}{dt} + \frac{dS_{river}}{dt} + \frac{dS_{inundation}}{dt} = \frac{1}{3.6} \cdot A \cdot R - Q_{out} \quad \dots(1)$$

S_{urban} : 各時間で市街地に存在する水量(m^3)

$S_{plateau}$: 各時間で丘陵地や台地に存在する水量(m^3)

$S_{paddyfield}$: 各時間で水田に存在する水量(m^3)

S_{river} : 各時間で水路網に存在する水量(m^3)

$S_{inundation}$: 各時間で道路や宅地等において豪雨による湛水あるいは、水路網の氾濫により浸水している水量(m^3)

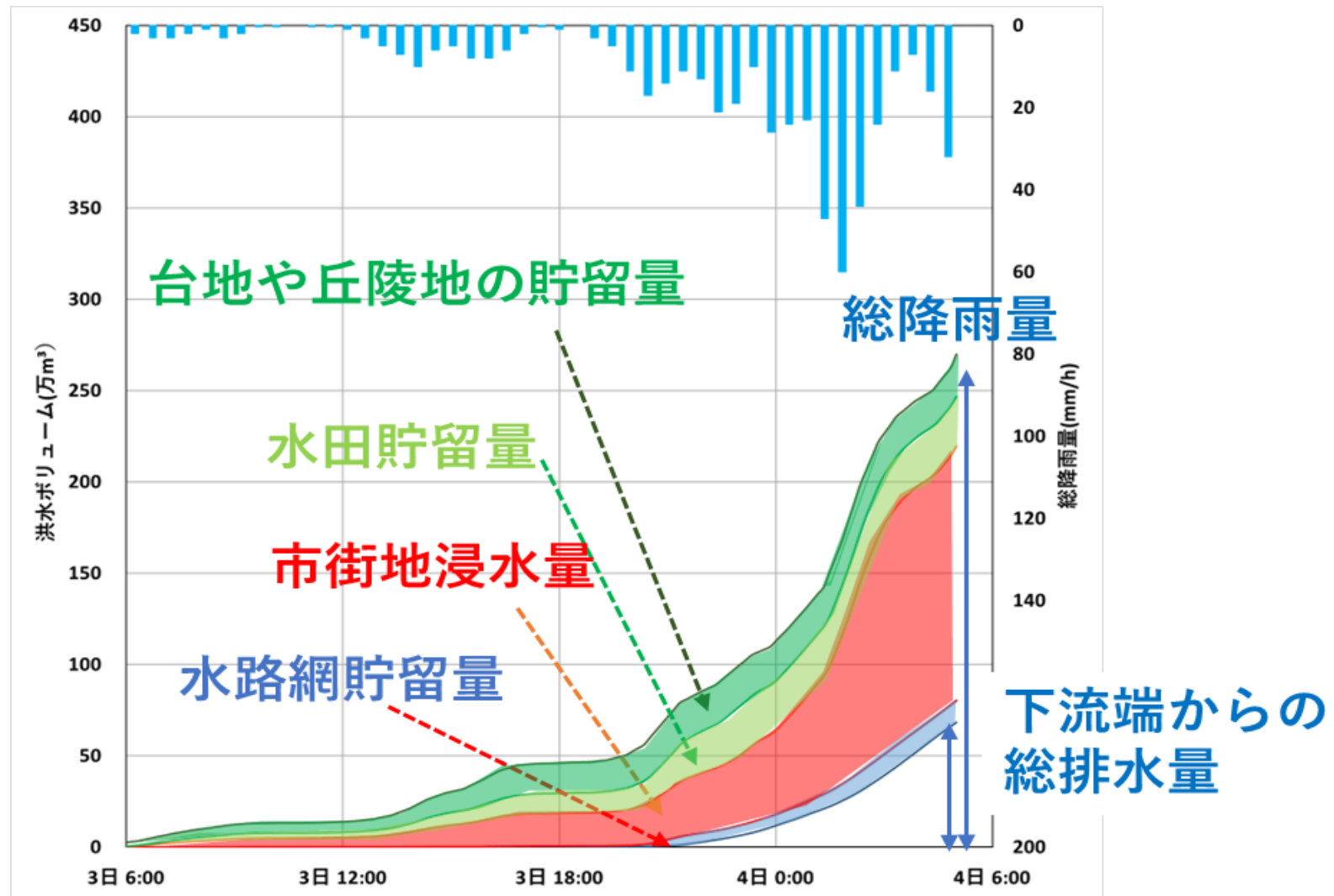
A : 流域面積(km^2)

R : 流域平均雨量(mm/h)

Q_{out} : 各水路からの排水量(m^3/s)

図-13で示すように、令和2年7月豪雨では、急激に浸水量が増加するため避難時に問題が生じたと考える。緑や黄緑色で示す丘陵地や水田等の貯留量を増加させることで、低地の浸水量の急激な上昇を抑制すること、ピークを低減させることが重要である。

図-13:令和2年7月豪雨 人吉市街地の流域水収支分布図（外水氾濫発生前の4日5時まで）



4ー5. 内水氾濫リアルタイム解析法 (RIMEC)の構築と避難への活用34

これまでの詳細解析の課題
詳細解析では、1日の豪雨解析に1週間程を要する。



リアルタイム内水氾濫解析

豪雨が予想される場合に、過去の豪雨事例の検討から得た避難に必要な時間を考慮して、発生豪雨を事前に想定・解析し、内水氾濫による浸水状況の事前把握と住民避難へ活かすことを狙いとしている。

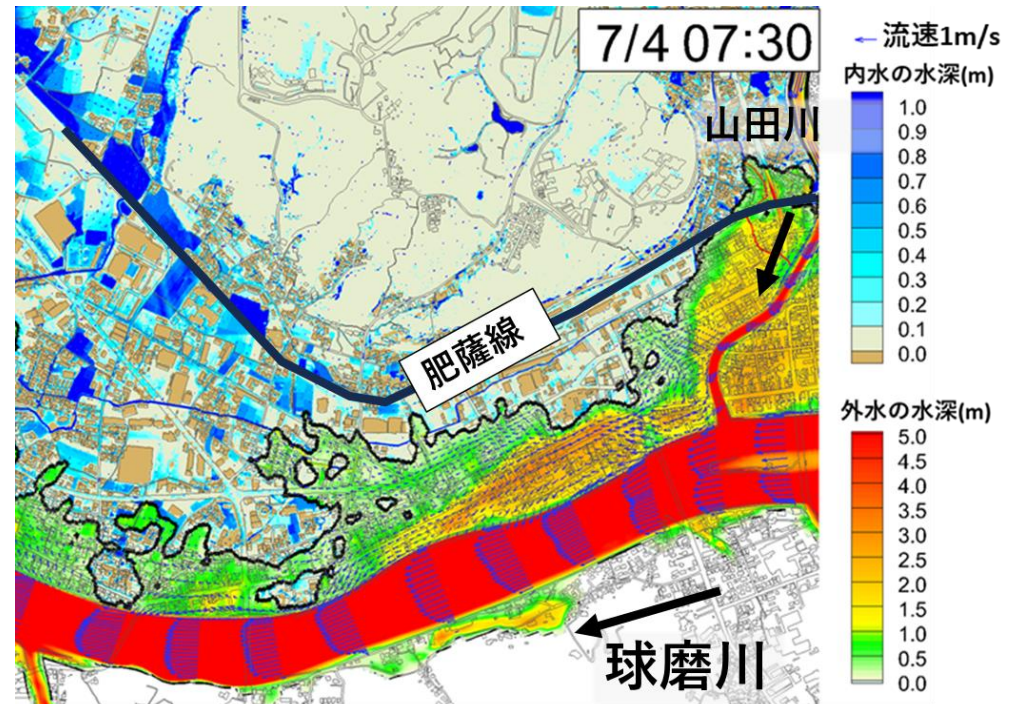


図-15:令和2年7月豪雨時の人吉市街地の内水氾濫と外水氾濫の解析結果の重ね図

詳細な内水氾濫解析で得られた浸水深や氾濫流速等の水理量を教師データとして、リアルタイム内水氾濫解析手法を構築する。

内水氾濫リアルタイム解析法の概要

Real-time 2D Inundation Model for Evacuation and
Community planning for flood mitigation
⇒ RIMEC

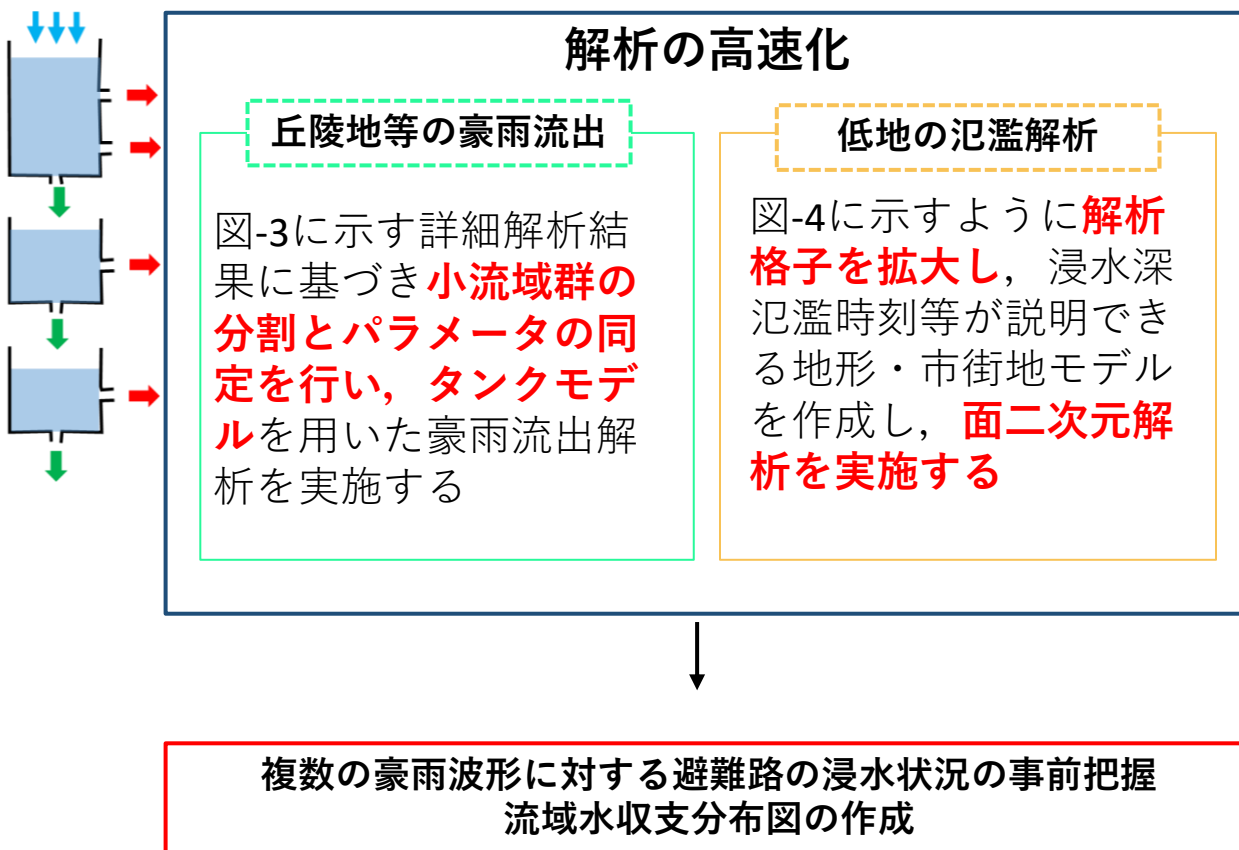
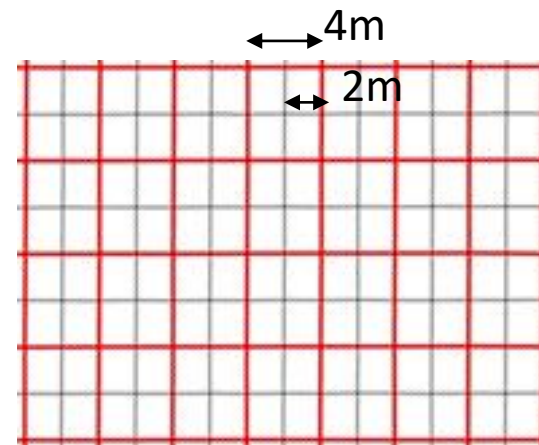


図-4：解析格子サイズの拡大
(人吉市街地の場合)



詳細解析：
令和2年7月豪雨の
3日0時～4日17時（29時間）
の解析に**170時間**を要する

リアルタイム解析：
令和2年7月豪雨の同様の解析
を**19時間**で解析できる

4-6. 高速化の工夫：丘陵地等へのタンクモデルの適用

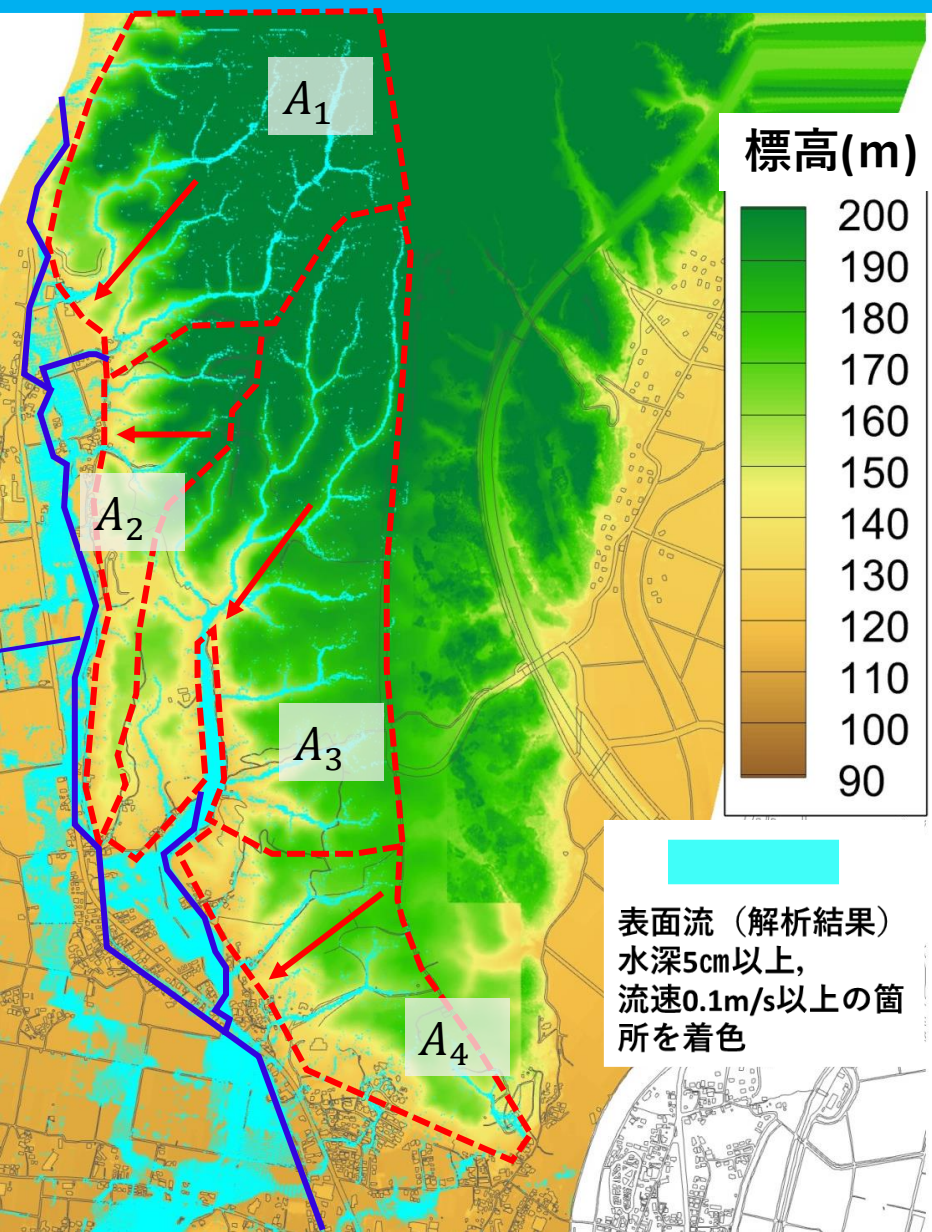


図-6で示す詳細解析の結果を基に、丘陵地及び台地を小流域に分割し、**タンクモデル¹⁾**のパラメータを同定する。以下の流出量等の名称は吉野ら²⁾を参考としている。

- 1) 菅原正巳：流出解析法，共立出版，1972
 - 2) 吉野文雄ら：分布型流出モデルの開発と実流域への適用，土木技術資料，1990
- 表層モデル

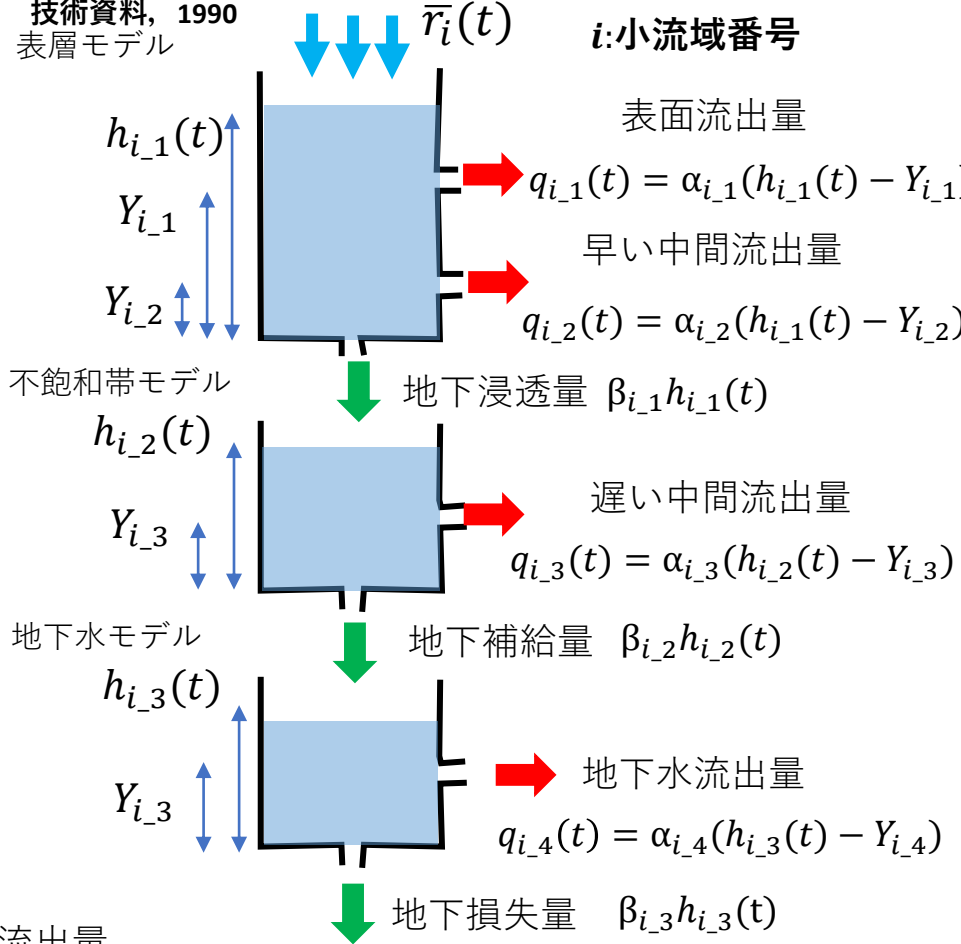


図-6:令和2年7月豪雨4日3時の詳細解析結果
(丘陵地面積：約2.2km²)

$$Q_i(t) = \frac{1}{3.6} (q_{i-1}(t) + q_{i-2}(t) + q_{i-3}(t) + q_{i-4}(t))A_i \quad 36$$

4-6. 高速化の工夫：タンクモデルを用いた流出量の算定

— タンクモデル
— 詳細解析

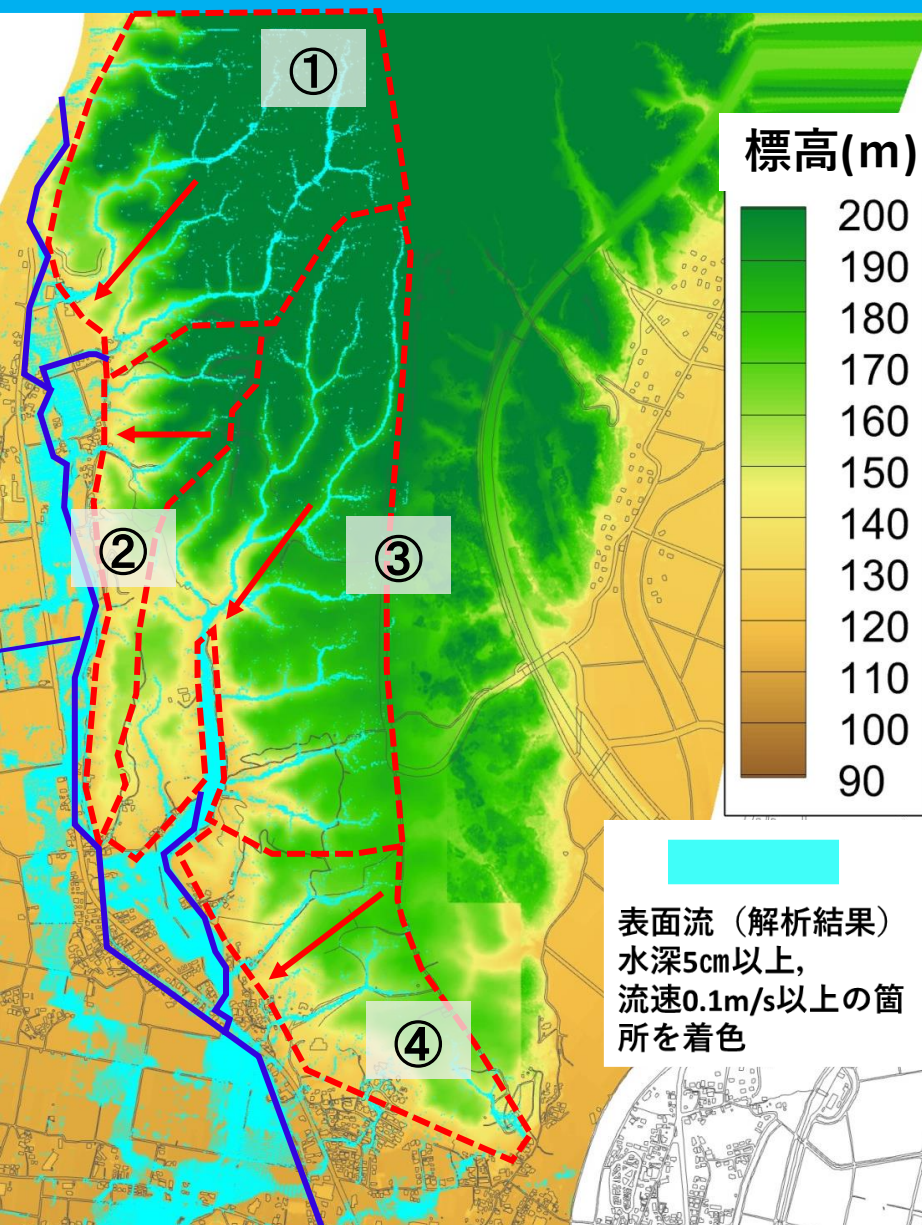
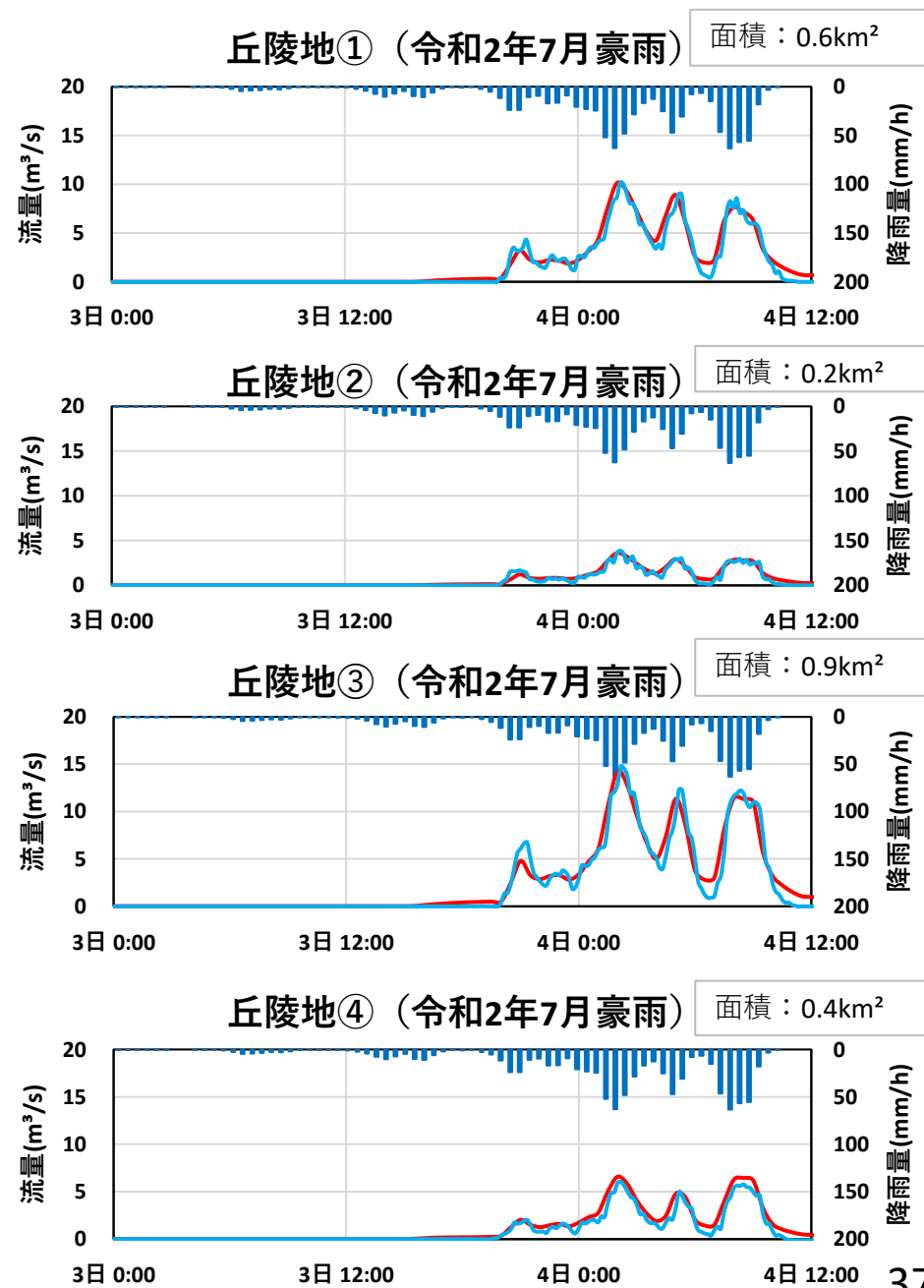


図-6:令和2年7月豪雨4日3時の詳細解析結果
(丘陵地面積：約2.2km²)



4-7 リアルタイム解析結果：避難路の浸水状況（令和2年7月豪雨）

避難所である人吉スポーツパレス周辺の解析結果を示す。令和2年7月豪雨時の幹線避難路の水面形や水位の急激な上昇等、詳細解析結果を説明することができる(図-7)。

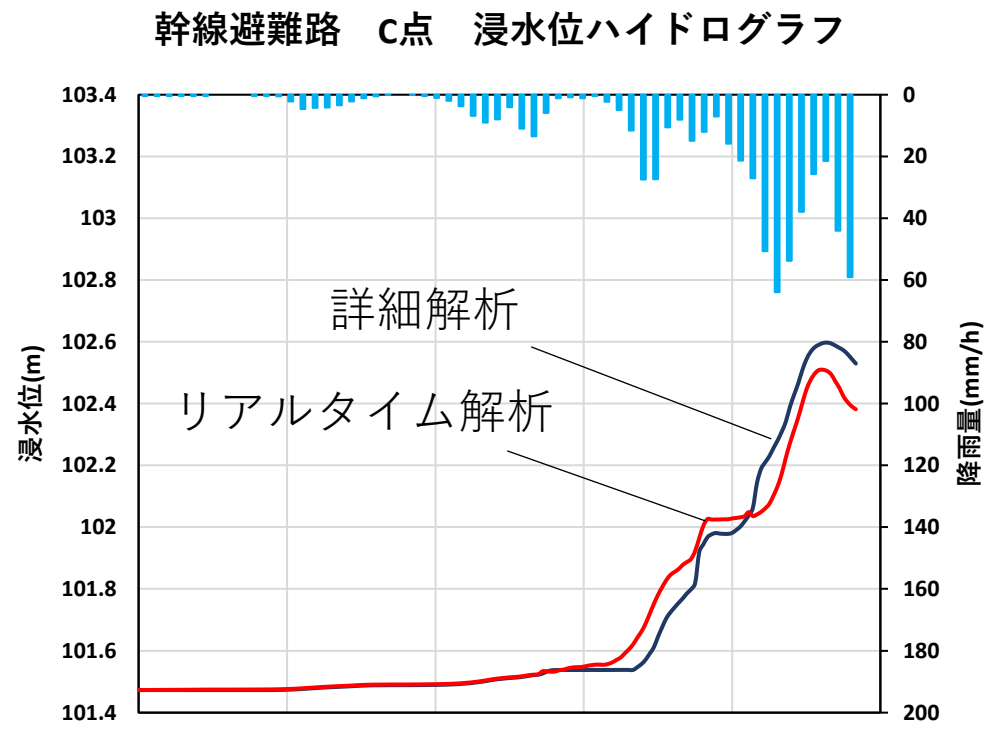
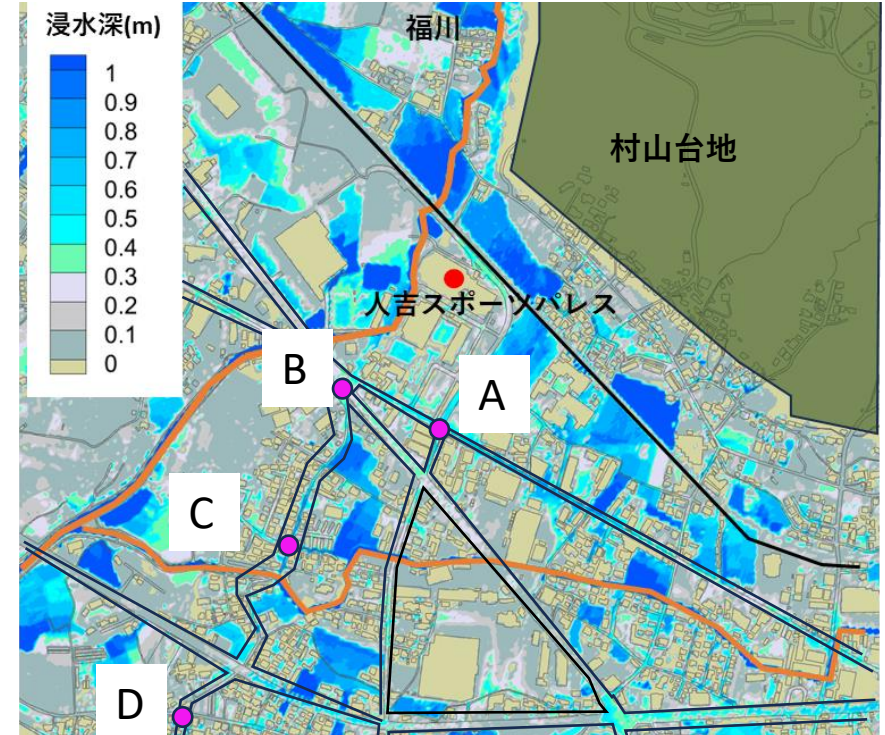
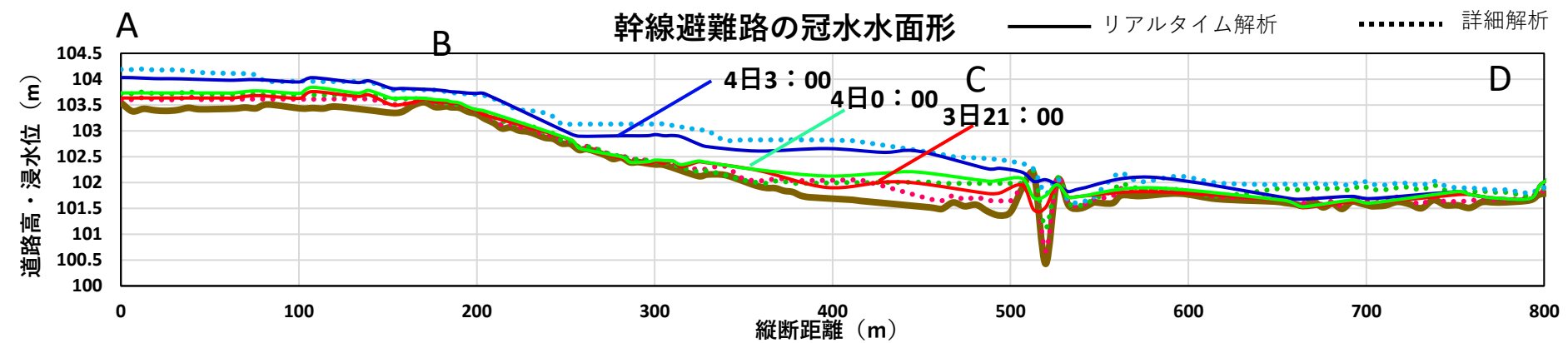


図-7:リアルタイム解析結果 4日3時の浸水状況

4.8 リアルタイム内水氾濫解析の住民の避難への活用に向けて

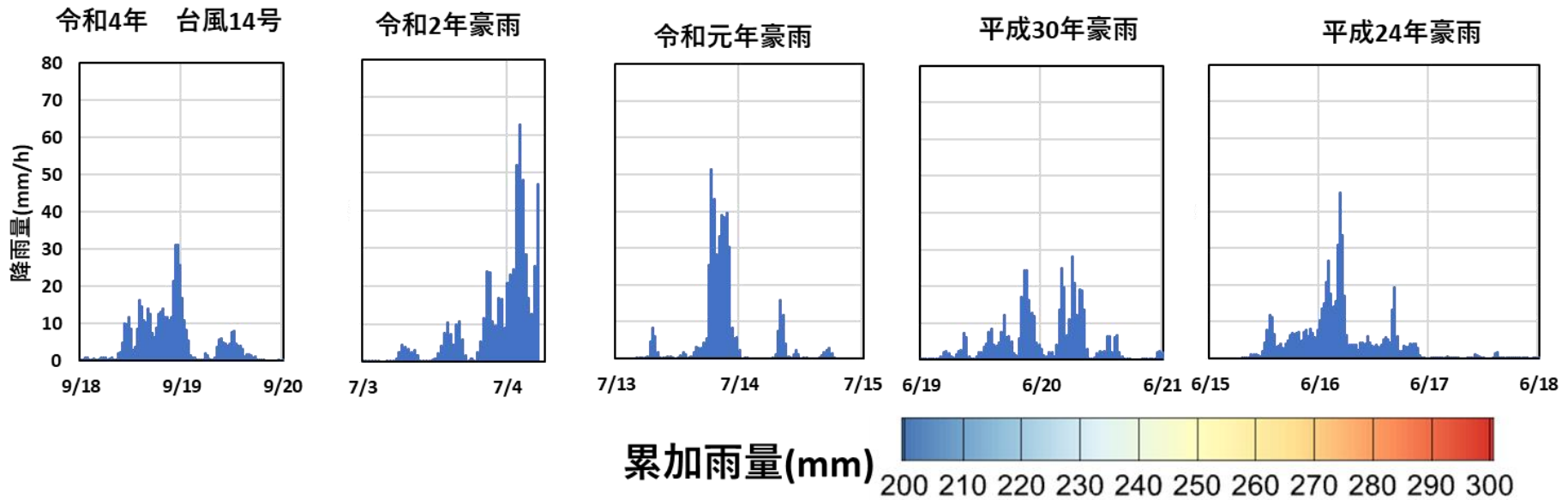
リアルタイム解析は、過去の豪雨事例の検討から得た避難に必要な時間を考慮して、発生豪雨を事前に想定・解析し、内水氾濫による浸水状況の事前把握と住民避難へ活かすことを狙いとしている。

以下の図に示すように令和2年7月豪雨では丘陵地に、令和元年豪雨では南部市街地に、平成18年豪雨では村山台地に豪雨が集中している。これらの豪雨についてリアルタイム内水氾濫解析を実施した結果、すべての豪雨に対して、降り始めから、10時間から20時間の間に累積雨量が80mmを超え、このとき主要避難道路上の浸水深が増大し、住民の避難所への移動が困難になった。

今後は、人吉市、熊本県、国交省と協力し実際に起こっている豪雨に対しリアルタイム解析検討の結果を適用し、これを参考にして経験を深め、信頼性の高い避難情報に高めていくことを考えている。

内水氾濫リアルタイム解析のため、過去に発生した豪雨群 を対象とした避難への活用について

40

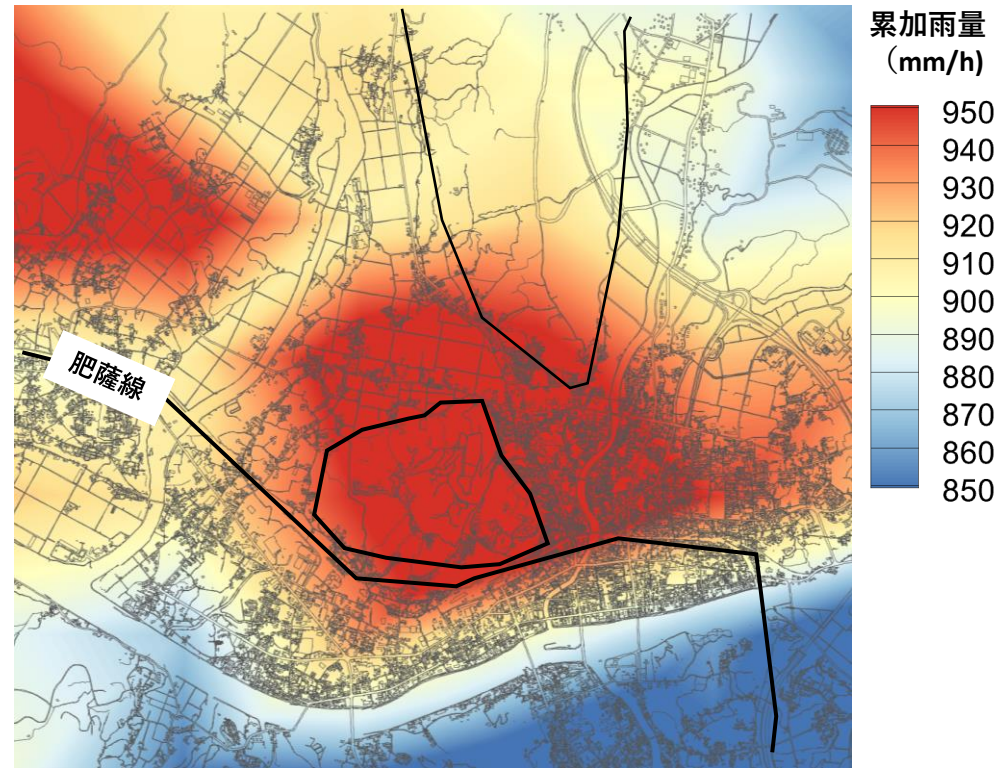
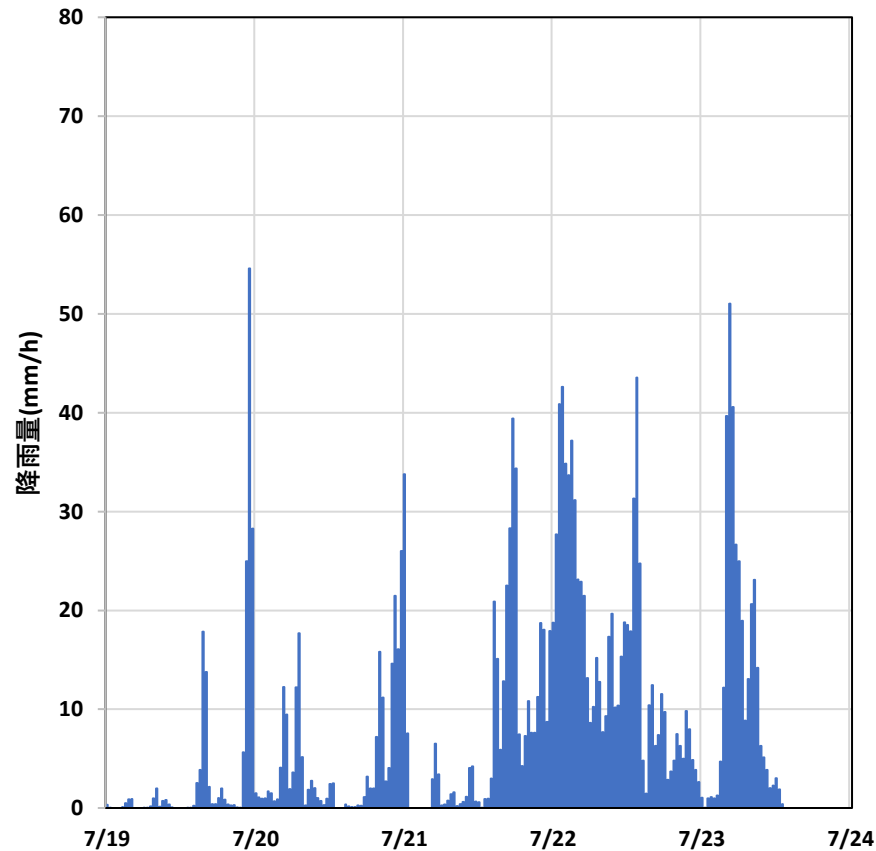


令和4年豪雨 累加雨量コンター 令和2年豪雨 累加雨量コンター 令和元年豪雨 累加雨量コンター 平成30年豪雨 累加雨量コンター 平成24年豪雨 累加雨量コンター

内水氾濫リアルタイム解析のための過去に発生した 豪雨群を対象とした避難への活用について

下図は、検討豪雨の時空間分布を示している。令和2年7月豪雨では丘陵地に、平成18年豪雨では村山台地に、令和元年豪雨では南部市街地に豪雨が集中しており、10km²の市街地内においても豪雨毎に降雨の集中箇所が異なる。

平成18年豪雨

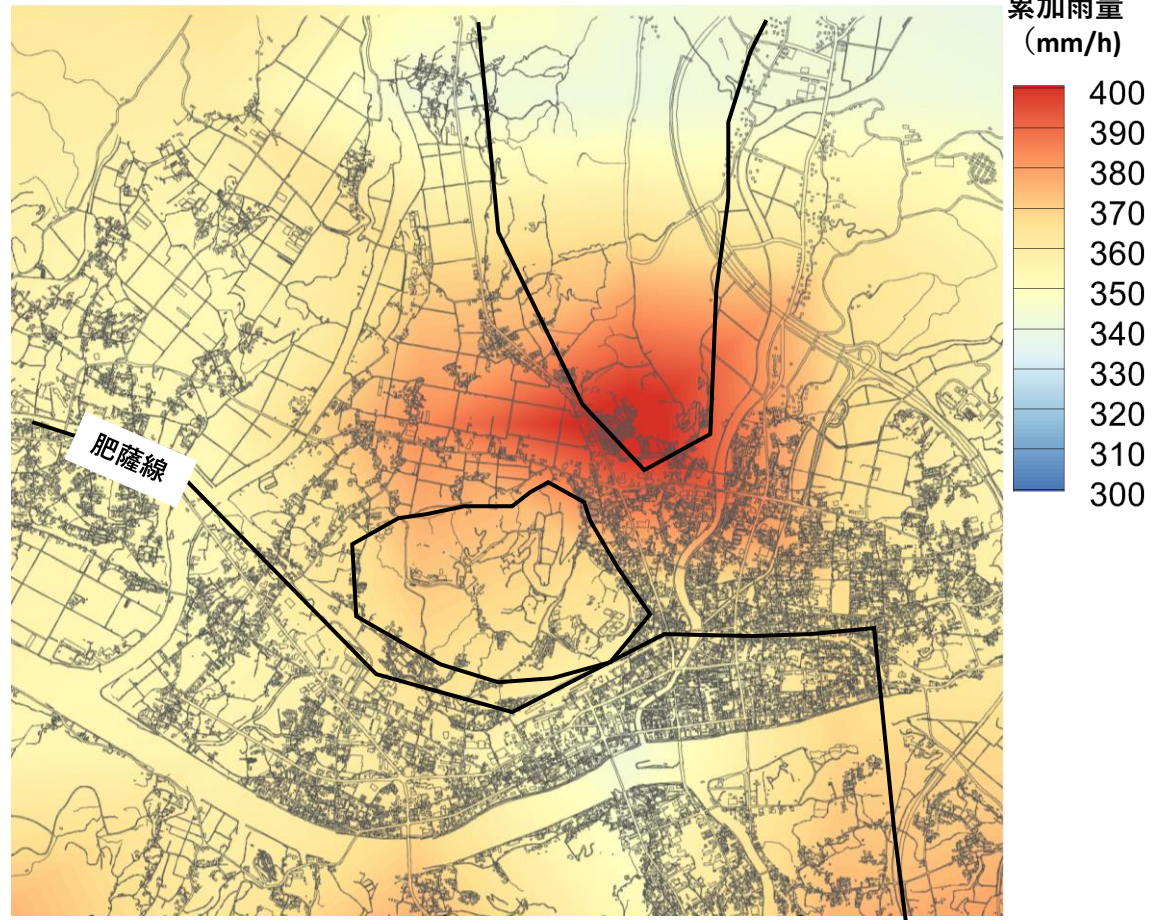
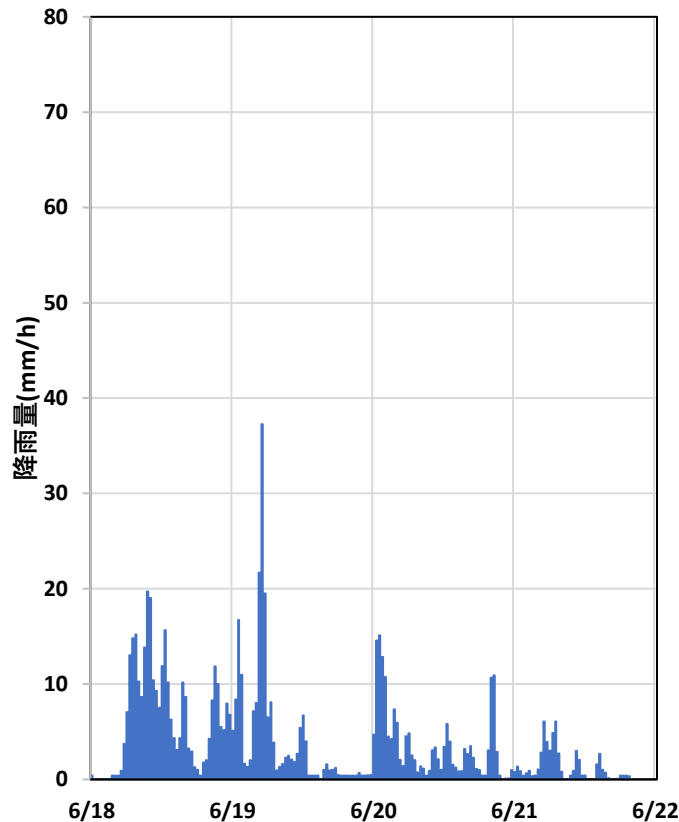


平成18年豪雨 累加雨量コンター

内水氾濫リアルタイム解析のための過去に発生した 豪雨群を対象とした避難への活用について

下図は、検討豪雨の時空間分布を示している。令和2年7月豪雨では丘陵地に、平成18年豪雨では村山台地に、令和元年豪雨では南部市街地に豪雨が集中しており、10km²の市街地内においても豪雨毎に降雨の集中箇所が異なる。

平成23年豪雨

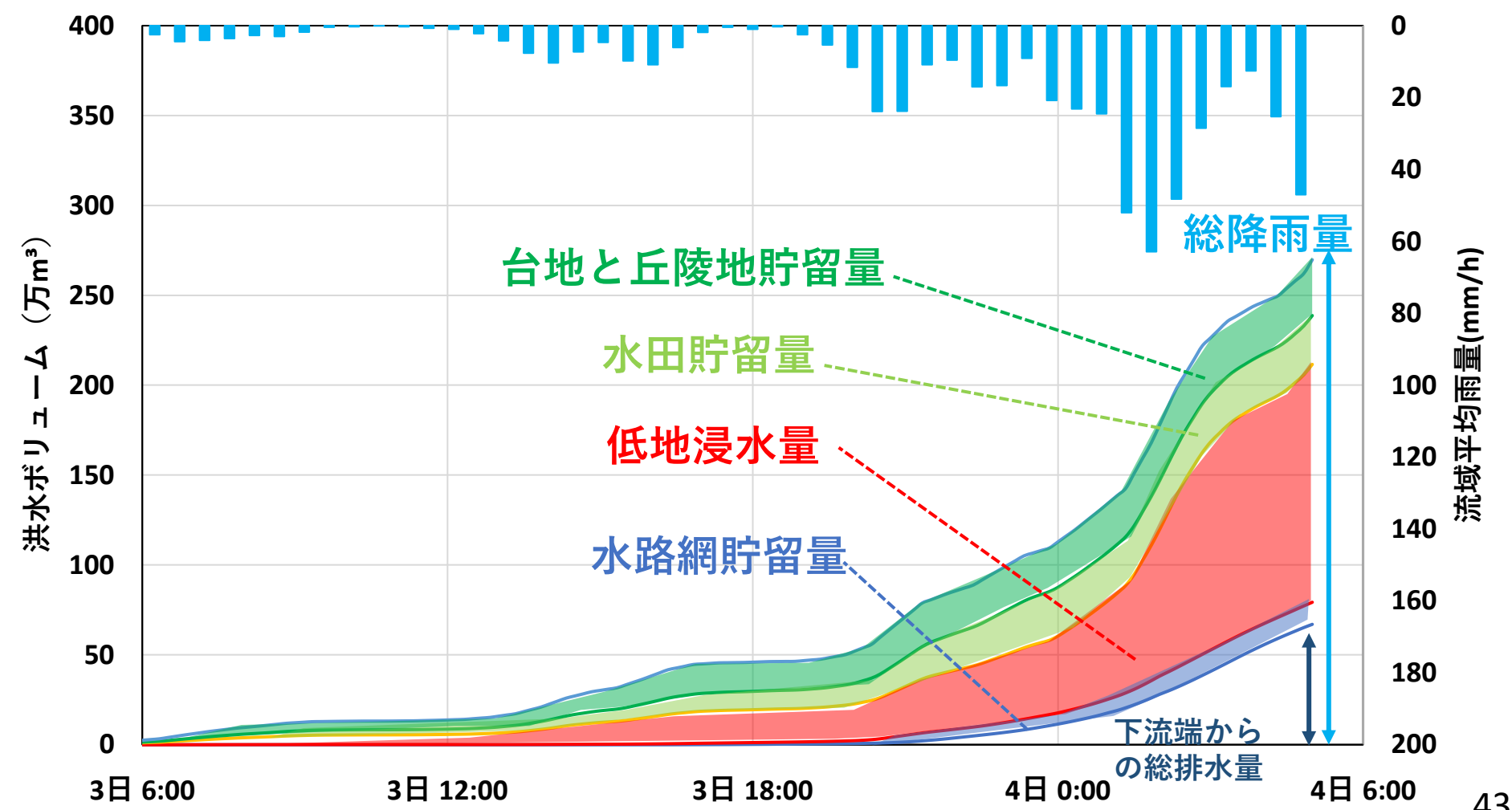


平成23年豪雨 累加雨量コンター

4-9 .リアルタイム解析結果による人吉市街地の流域水収支分布図

リアルタイム解析を用いて人吉市街地の流域水収支分布図を作成した（図-8）．
下図で示すように、令和2年7月豪雨では、急激に浸水量が増加するため避難時に問題が生じたと考える．
今後は、緑・黄緑で示す丘陵地や水田での貯留量を増加させることで、浸水量の低減やピークを遅らせることが重要となる．

図-8：令和2年7月豪雨 人吉市街地の流域水収支分布図（外水氾濫発生前の4日5時まで）



4-10 流域水収支分布図を用いた避難・減災まちづくりへの活用

流域水収支分布図を用いた避難や減災まちづくりへの検討例を示す。考える対策は、現在建設中の二次放水路、山江川上流域での水田貯留（貯水深：50cm）、鶴見川流域の事例を参考に台地上の公共施設（校庭・テニスコートの貯水深：30cm）の治水利用等を想定する(図-9)。これらの対策効果を水収支分布図を用いて推算する。

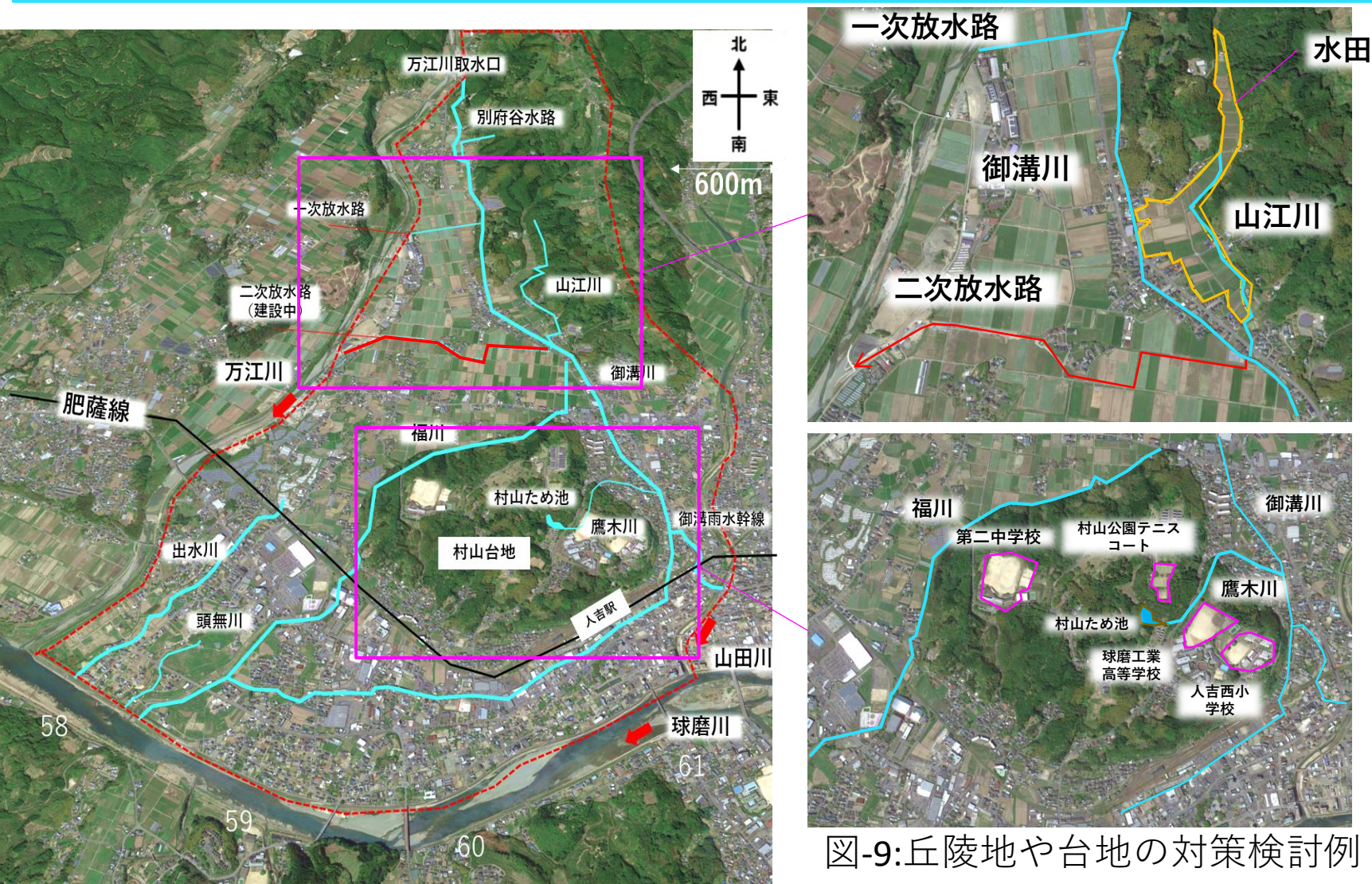


図-9:丘陵地や台地の対策検討例

4-10 流域水収支分布図を用いた避難・減災まちづくりへの活用

図-10, 図-11に示すように二次放水路による排水量の増加, 流域対策による流出量の低減により, 浸水量が132万 m^3 から103万 m^3 程に低減することが推算できた。(校庭貯留, テニスコート貯留, 水田貯留の増分等は低地浸水量に置き換わると考えている。) **流域水収支分布図を用いた内水氾濫現象や対策効果の見える化が, 住民の避難計画や今後の減災まちづくりに役立つと考える。**

図-10 : 令和2年7月豪雨 人吉市街地の流域水収支分布図
(対策未考慮)

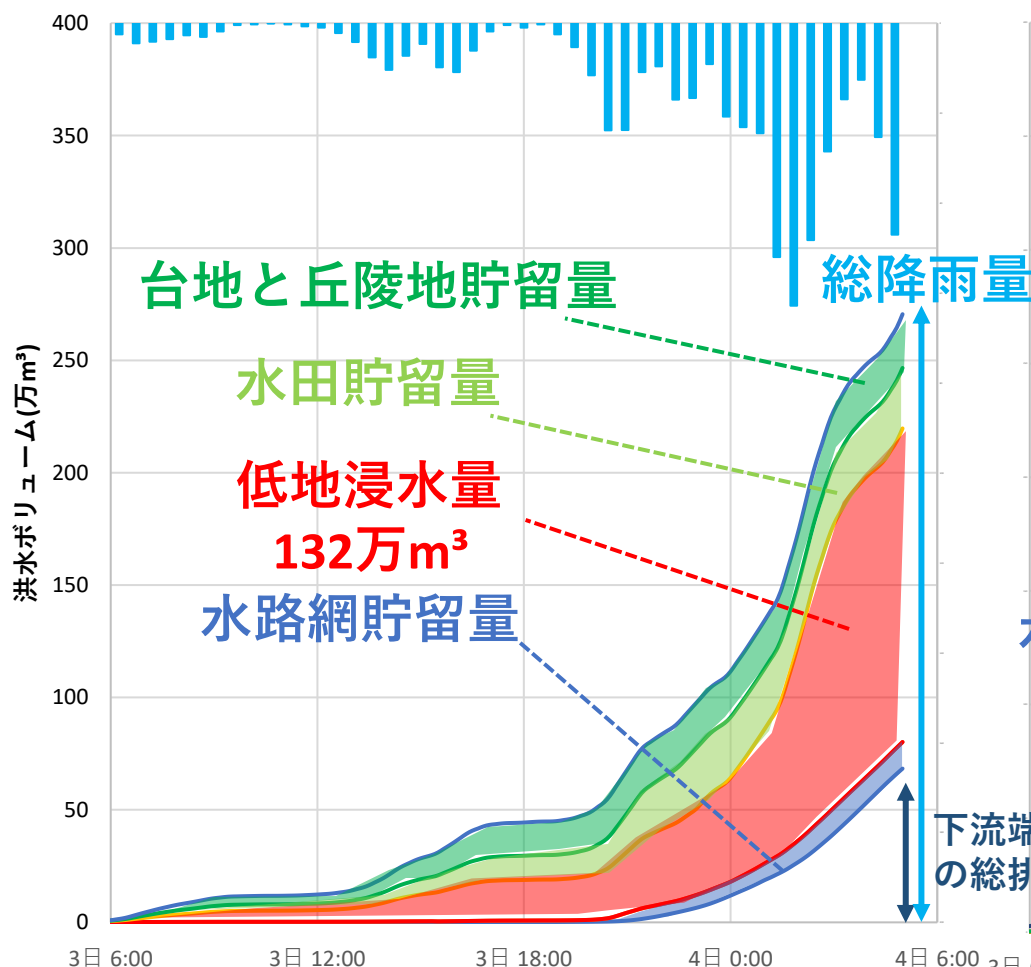
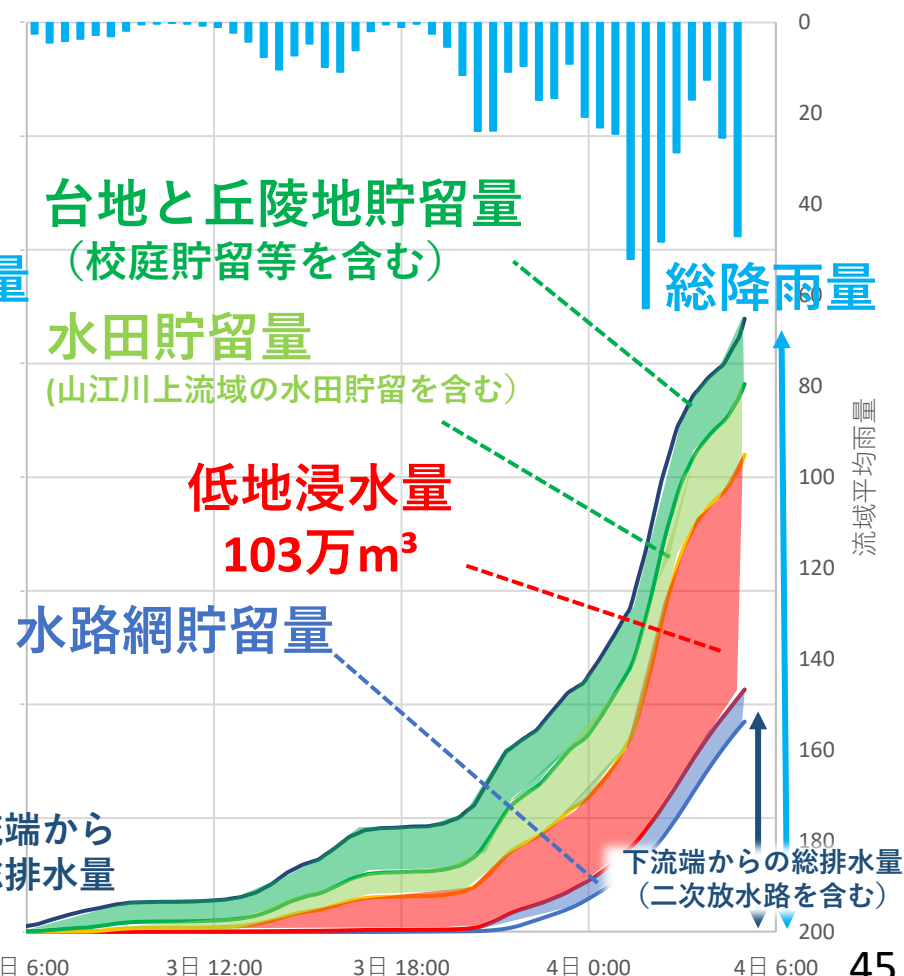


図-11 : 令和2年7月豪雨 人吉市街地の流域水収支分布図
(二次放水路+流域対策)



5. 流域土砂収支を流域水収支と一体的に 検討するためには

- ・豪雨時には洪水流とともに土砂が河川流域から大量に流出し，河川の大きな影響をもたらすことから，水収支だけでは自然地形の変化を知るには十分ではなく今後流域水収支と一体的に土砂収支についても検討する必要がある．
- ・流域の土砂の移動量の観測は，水量のように連続的な流動ではないために測定数が少なく，また測定に危険を伴うために容易ではない．流域土砂収支の考え方については，総合土砂管理の観点で計画論的な検討は行われていることになっているものの，観測値に基づく実質的検討は出来ていない．
- ・これまでの砂防分野、治山分野等で蓄積されてきた知識とデータ情報をベースに土砂移動の状況を捉えることがまず必要である．それ等より生産域の土砂が豪雨強度や豪雨量とどのような関係にあるか，どのような豪雨イベントで土砂の移動量を観測し，どのような累積時間で土砂収支図をつくればよいのかについて検討することが急がれる．
- ・ドローンやレーザプロファイラー等近年の新しい機動的な観測方法を用いた地形測量等からまずは，全流域での土砂収支にこだわらず，観測出来る区間，検討が必要な区間から土砂収支について地域の特性との関係を考慮して行えばよい．

- 具体的には、まずは対象とする流域区間の上流端，下流端で流入する土砂量ボリューム、流出する土砂量ボリュームを把握することが重要となる。上流端では、崩壊地の経年的地形変化の調査から、土砂収支図を作るための上流端での累積流入土砂量を把握したい。これは流域水収支図では、豪雨の累積量に相当するものである。検討区間の河道下流端では、出ていく土砂の累積移動ボリュームを算定する。これにより、検討流域区間内の土砂収支を検討する準備が出来ることになる。
- 検討対象区間について、土砂洪水解析，洪水土砂解析から砂防区間，河道区間の土砂移動量を把握する。このような観測と解析を続けデータを集めることによって土砂収支図をつくり，流域特性，豪雨の特性，累積土砂移動量から土砂収支図を見直す。この検討プロセスの中から外力である豪雨との関係で観測データを収集する適切な回数，時間，観測法，土砂収支図の利用の仕方を学ぶ。
- 本格的な土砂収支図を作るためには，流砂量観測法および，流砂量解析法洪水流解析法，河床材料調査法等，目的に即した技術開発が本格的に行われる体制をつくらなければならない。

(1) 本川，支川流域での流域水収支図の作り方とその活用

- (1) 流域治水に必要なことは洪水流の観測データと本川・支川群の河道測量データの収集とその河川の洪水特性を表現できる解析法を用いることである．そして、過去に起こった洪水流とその被害の状況等流域の特性を捉え，分析し，これらの結果を関係者間で共有し流域治水の着実な実現を図ることである．
- (2) 近年，洪水時の水位ハイドログラフは全国の河川で測られており，限定された区間であってもこれを用いた河道貯留量等の検討は可能である．それは本川だけでも，支川だけでも，限られた河川延長区間での水位データにによる検討であってよい．
- (3) 流域に降った雨が，いつ，どこに，どのような量がどのような状態で流域に分布しているかを表現する「流域水収支図」は，流域治水検討の核になる技術である．「流域治水」の基本は，流域における降雨・流出から洪水に至る機構を自然の仕組みの中で捉え，解析し，理解することであり，これには「流域水収支図」を基本に据えて検討することが必要である．流域治水の対象は，大河川だけでなく，大河川流域，各支川流域，内水氾濫流域もあり，洪水氾濫現象を流域の自然と社会・経済の関係で，全体的，階層的，多様に捉え論ずる必要がある．このために流域水収支分布は重要となる．

- (4) 洪水流の多点での水位観測とそれに基づく水面形解析は、石狩川とその支川の千歳川の水収支図で見てきたように種々のスケールの流域内の時空間的な水収支状況を見える化することが出来る。流域内の面積の大部分を占める水面形の観測が出来ない小河川国土数値情報河川データセットにある平水時の幅が1.5m以上からなる1条河川及びその上流の水面の無い領域を小流域群に分割しこれをタンクモデルで表現する。石狩川の支川豊平川流域解析で示したように種々の形態の流出ハイドログラフを求めることが出来る。これらの検討により流域の水収支分布状況の検討が可能になり、流域治水対策のための技術的基盤が与えられている。
- (5) 降雨分布に対して、降雨流出形態、水収支分布が地形、地質構造、森林分布、基岩等の存在特性、本・支川、2次支川、3次支川の配置、構成等の関係でどのように異なるかが明らかになることによって、水問題が関係する異なる研究分野間の活発な議論が可能となる。流域治水は河川関係者だけではできず、すべての関係者が関わる国土の管理に関係する大きな事業であり、長期的視点で進めることが必要である。
- (6) 流域治水を進めるには水文学と河川工学、都市・地域計画学等の間で密接な協働が必要であり、また「自然と人間との共生」を共有する他の関係する分野と連携、協働して互いの研究分野間の議論を深め、流域の安全性を国土計画、国土管理の視点で考える重要な機会となる。

- (7) 現在あるデータで流域水収支の検討をしてみると、水位データ不足が深刻であり、特に流域の広い面積を占める支川群の水面形データは十分そろっていないことに気づくであろう。時間がかかっても、水面形が求まる水位データ等を河川の上流区間まで測れるようにすることが行われることが国土の安全性のために必要である。
- (8) 豊平川では、山地砂防河川で洪水水位が測られており、また利根川上流河川、斐伊川、太田川等では多くの二次、三次支川で洪水水位が測られており、水面形の時間変化データを集めることで流域水収支図の検討が進んでいる。洪水時の水面形の観測は、流域治水にとって最も重要な仕事であり、時間を要しても水位観測データの収集を行ってほしい。

(2) 内水氾濫流域における水収支図とその活用

- (1) 2mの詳細な解析格子を用いた内水氾濫解析（以下、詳細解析と呼ぶ）により令和2年7月豪雨時の人吉市街地における内水氾濫の実態を解明し、人吉市街地の浸水状況を再現した。外水氾濫が想定される場合の住民の避難や内水氾濫の被害軽減に向けた検討に対し有効であることを示した。
- (2) 球磨川や万江川等の外水氾濫が想定される場合の内水氾濫初期段階での避難とこれを支える予測技術の必要性を明らかにした。
- (3) 詳細解析の結果を教師データとして、解析格子サイズの拡大、丘陵地等の降雨流出量の算定にタンクモデルの適用することで解析の高速化を行い、内水氾濫リアルタイム解析法（RIMEC）を構築した。
人吉市街地の複数の主要な豪雨にRIMECを適用し、累加雨量と浸水状況の関係から、どの豪雨においても累加雨量80mm程に達する（累加時間：10～20時間）と歩行避難の困難な浸水状況となることを明らかにした。

- (4) 氾濫解析の結果を基に市街地域における流域水収支分布図を構築した。令和2年7月豪雨のような降雨が短時間に集中する場合には市内の浸水量が急激に増大し、避難に問題が生じやすいことを見える化した。また、内水災害の被害軽減に向けて対策検討例を示し、「流域水収支分布図を用いた内水氾濫現象・対策効果の見える化が、住民の避難計画や今後の減災まちづくりに役立つことを示した。
- (5) 住民避難については、これまで発生した人吉市周辺での多数の豪雨波形に対する氾濫の進行、道路の浸水深を事前に解析しておき、また起こっていない波形に対しても解析を行い、これから起こる豪雨に対し、これらの中から類似の降雨を選び、避難のリードタイムを含め試行を数多く行うことによって住民避難の適用精度を上げていくことになる。

参考文献

- 1) 国土交通省：特定都市河川浸水被害対策法等の一部を改正する法律（流域治水関連法），2021年11月．
- 2) 福岡捷二：近年の洪水災害を踏まえた流域治水を考える，河川技術論文集，第28巻，pp. 457-462，2022. 6
- 3) 福岡捷二，渡邊明英，原 俊彦，秋山正人：水面形の時間変化と非定常二次元解析を用いた洪水流量ハイドログラフと貯留量の高精度推算，土木学会論文集，No. 761/Ⅱ-67，pp. 45-56，2004.
- 4) 福岡捷二：招待論文，洪水流の水面形観測の意義と水面形に基づく河川の維持管理技術，河川技術論文集，第12巻，pp. 1-6，2006.
- 5) 福岡捷二：実務面からみた洪水流・河床変動解析法の最前線と今後の調査研究の方向性，河川技術論文集，第20巻，pp. 253-258，2014.
- 6) 福岡 捷二：洪水流の水位と流量の今日的考え方 ―多点で観測された洪水水位と水面形から河道の水理システムを見える化する―，土木学会論文集B1(水工学)，Vol. 73，No. 4，I_637-I_642，2017. 2.
- 7) 福岡捷二：洪水水面形観測情報の広域的・統合的活用による流域治水の考え方の構築に向けて，河川技術論文集，第23巻，pp. 251-256，2017. 6.
- 8) 福岡捷二，田端幸輔，出口桂輔：平成27年9月洪水における鬼怒川下流区間の流下能力，河道貯留及び河道安定性の検討，河川技術論文集，第22巻，pp. 373-378，2016. 6.
- 9) 田端幸輔，福岡捷二，吉井拓也：平成27年9月鬼怒川流域における洪水流・氾濫流の一体解析に基づく水害リスク軽減策に関する研究，土木学会論文集B1(水工学)，Vol. 74，No. 4，pp. I_1399-I_1404，2018. 2.
- 10) 後藤岳久，福岡捷二，大作和弘：観測水面形時系列から求めた本・支川の流量ハイドログラフを用いたタンクモデルの定数同定と洪水予測計算，土木学会論文集B1(水工学)，Vol. 75，No. 2，pp. I_1291-I_1296，2019. 11.
- 11) 田端幸輔，後藤岳久，竹村吉晴，酒匂一樹，福岡捷二：令和2年7月球磨川豪雨における洪水流と氾濫流の一体解析による人吉市街地と狹隘区間の集落の被害分析，河川技術論文集，第27巻，pp. 597-602，2021. 6.
- 12) 見上哲章，水草浩一，西澤洋行，安達孝実，福岡捷二：利根川上流域の本・支川を一体とした洪水流解析―流域治水への活用に向けて―，土木学会論文集B1(水工学)，Vol. 77，No. 2，pp. I_427-I_432，2021. 12.
- 13) 石井優太朗，吉村俊彦，福岡捷二：石狩川下流域における支川群の洪水流出特性と本川洪水への影響，河川技術論文集，第28巻，pp. 121-126，2022. 6. 18) 菅原正巳：流出解析法，共立出版，1972. 11
- 14) 吉野文雄，吉谷純一，堀内輝亮：分布型流出モデルの開発と実流域への適用，土木技術資料，pp. 54-59，1990

- 15) 小葉竹重機, 石原安雄: タンクモデルおよび集中面積図を利用した洪水流出モデルの総合化, 土木学会論文報告集, 第337号, pp. 129-135, 1983. 9.
- 16) 立川康人, 永谷言, 寶馨: 飽和・不飽和流れの機構を導入した流量流積関係式の開発, 水工学論文集, 第48巻, pp. 7-12, 2004. 2.
- 17) 国土地理院: 平成25年2万5千分1地形図, pp. 7, 2004. 3.
- 18) 山崎大, 富樫冨佳, 竹島滉, 佐山敬洋: 日本全域高解像度の表面流向データ整備, 土木学会論文集B1(水工学), Vol. 74, No. 5, pp. I_163-I_168, 2018. 5.
- 19) 佐山敬洋, 藤岡奨, 牛山朋來, 建部祐哉, 深見和彦: インダス川全流域を対象とした2010年パキスタン洪水の降雨流出氾濫解析, 土木学会論文集B1(水工学), Vol. 68, No. 4, pp. I_493-I_498, 2011. 9.
- 20) 佐山敬洋, 建部祐哉, 藤岡奨, 牛山朋來, 萬矢 敦啓, 田中茂信: 2011年タイ洪水を対象にした緊急対応の降雨流出氾濫予測, 土木学会論文集B1(水工学), Vol. 69, No. 1, pp. 14-29, 2012. 5.
- 21) 建部祐哉, 佐山敬洋, 牛山朋來, 藤岡奨, 田中茂信: チャオプラヤ川流域における長期降雨流出氾濫解析, 土木学会論文集B1(水工学), Vol. 69, No. 4, pp. I_457-I_462, 2012. 9.
- 22) 福岡龍, 福岡捷二, 赤池雄二, 万江尚幸, 山本修一, 鳥越輝喜, 仲田裕一郎, 向田清峻: 豪雨時における人吉市内の内水氾濫機構の分析と被害軽減に向けた検討, 河川技術論文集, 第29巻, pp. 419-424, 2023. 6.
- 23) 福岡 捷二: 大規模氾濫時の被害軽減のための水害共生社会制度の構築に向けて—治水施設のストックと水防法等との発展を融合させた流域治水, 法律時報, 91巻, 12号, pp. 72-78, 2019. 11.
- 24) 福岡 捷二: 大規模洪水氾濫被害軽減のための河川と都市の水防災連携, (社)計画・交通研究会 会報pp. 12-13, 2020. 1.
- 25) 福岡龍, 福岡捷二: 自治体の水防災まちづくりに関する法律・制度から見た検討とその課題, 河川技術論文集, 第28巻, pp. 379-384, 2022. 6.