

降雨流出氾濫(RRI)解析モデルについて

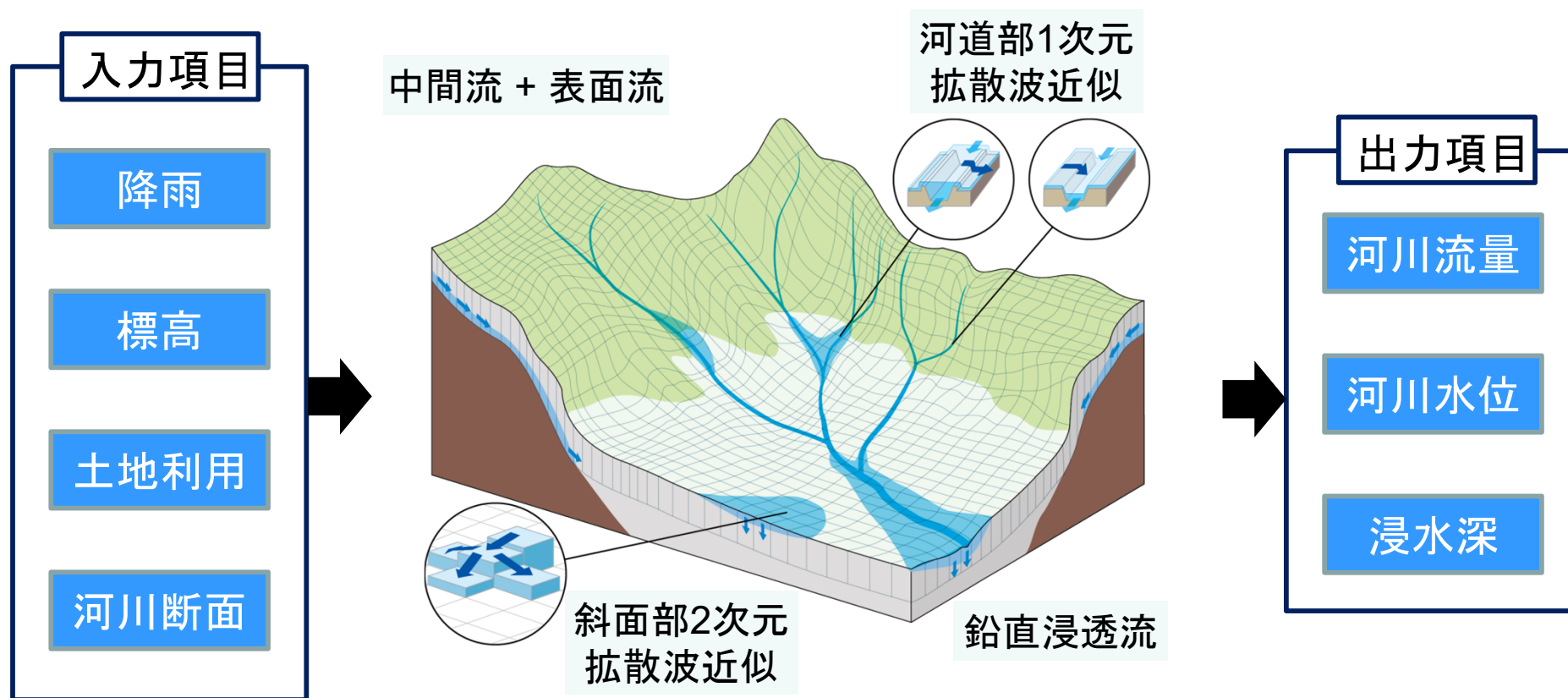
国立研究開発法人 土木研究所
水災害・リスクマネジメント国際センター
(ICHARM)

研究員 柿沼 太貴

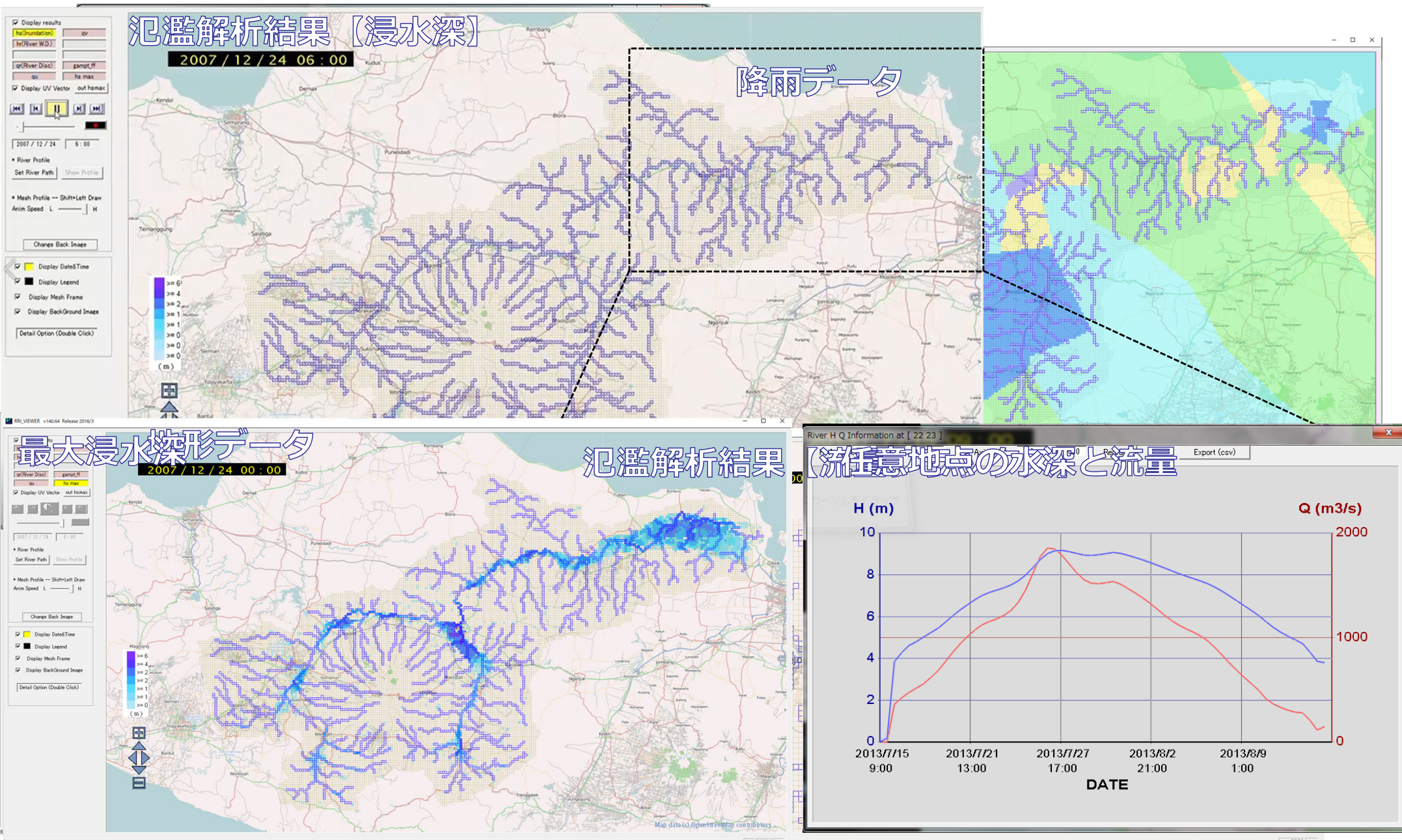
2013年「第15回国土技術開発賞(優秀賞)」
(主催:(一財)国土技術開発センター)
※建設産業におけるハードな技術のみならず、ソフトな
技術も含めた広範な新技術を対象として表彰される賞

降雨(Rainfall)-流出(Runoff)-氾濫(Inundation)解析モデル

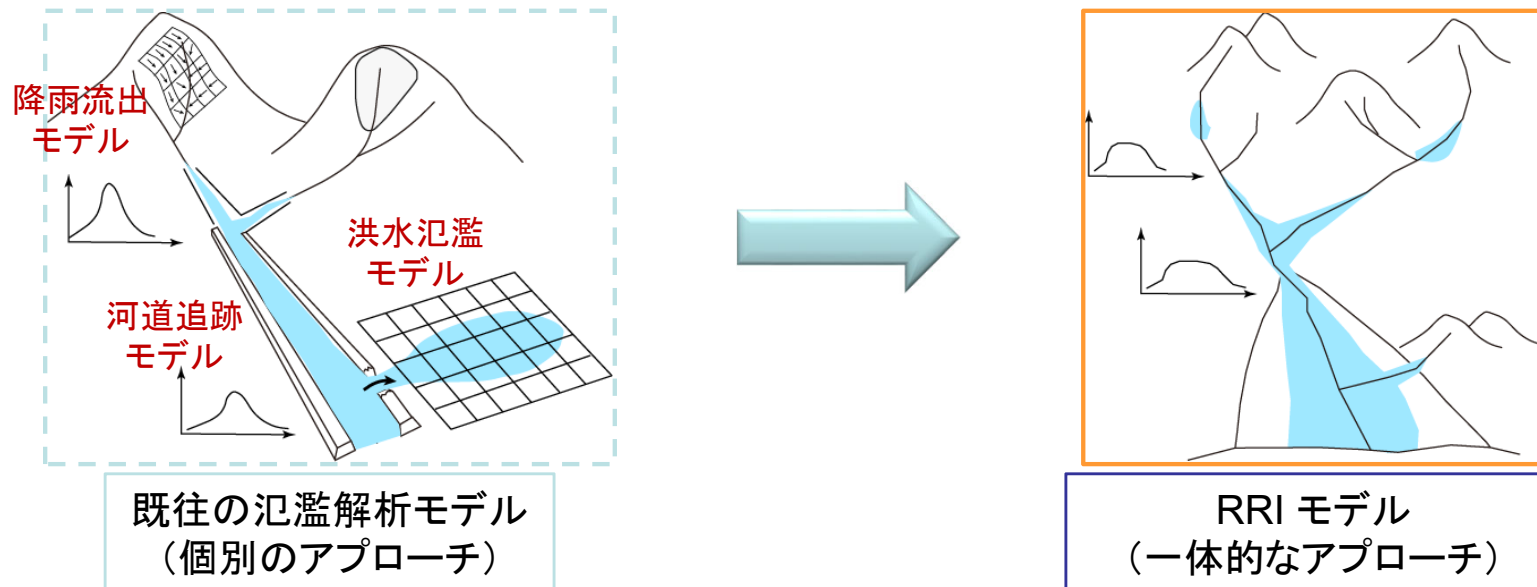
〔 衛星情報や気象予測情報を活用して、世界各地の洪水氾濫を予測可能な技術 〕

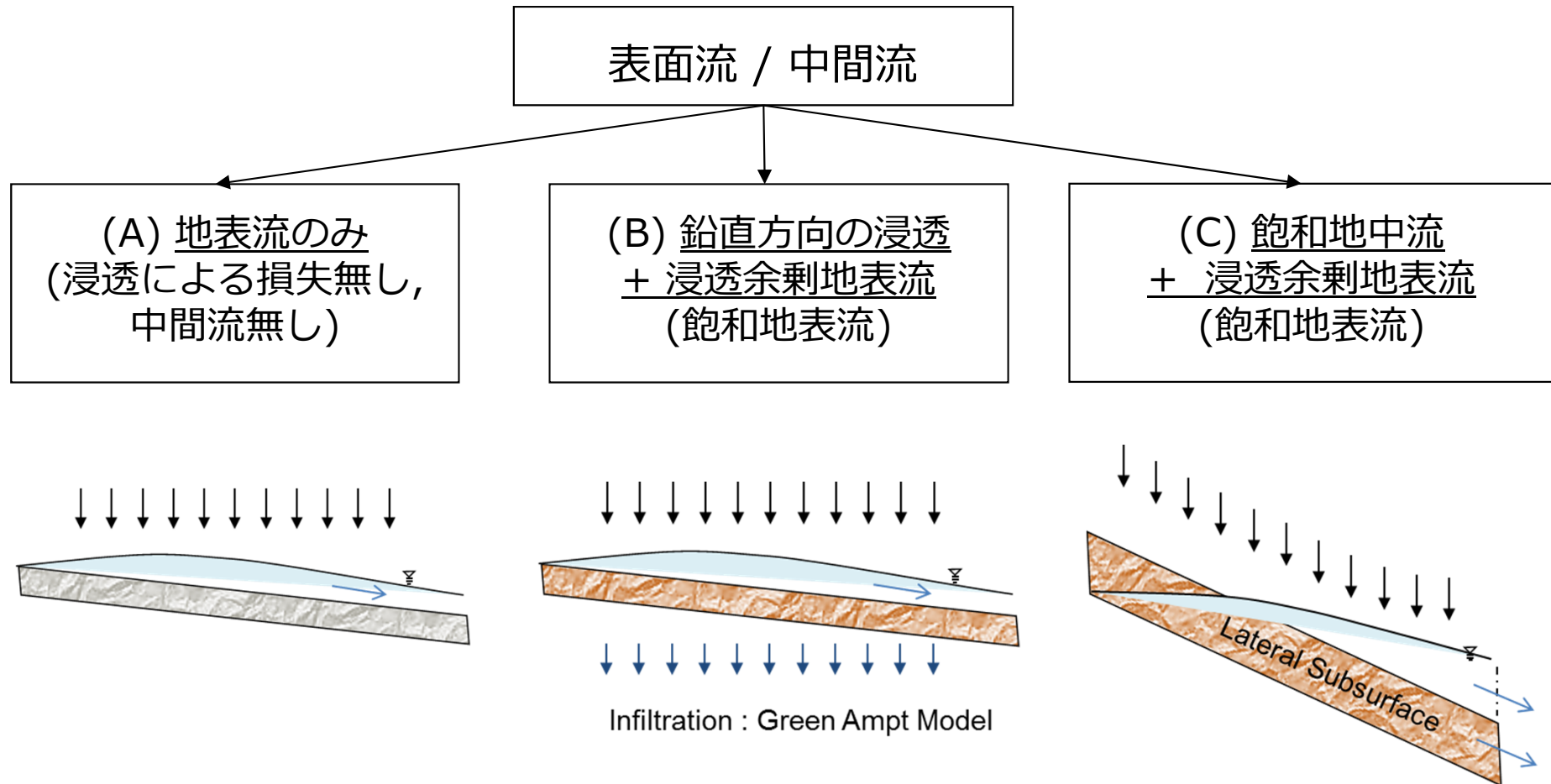


RRIモデルの概念図



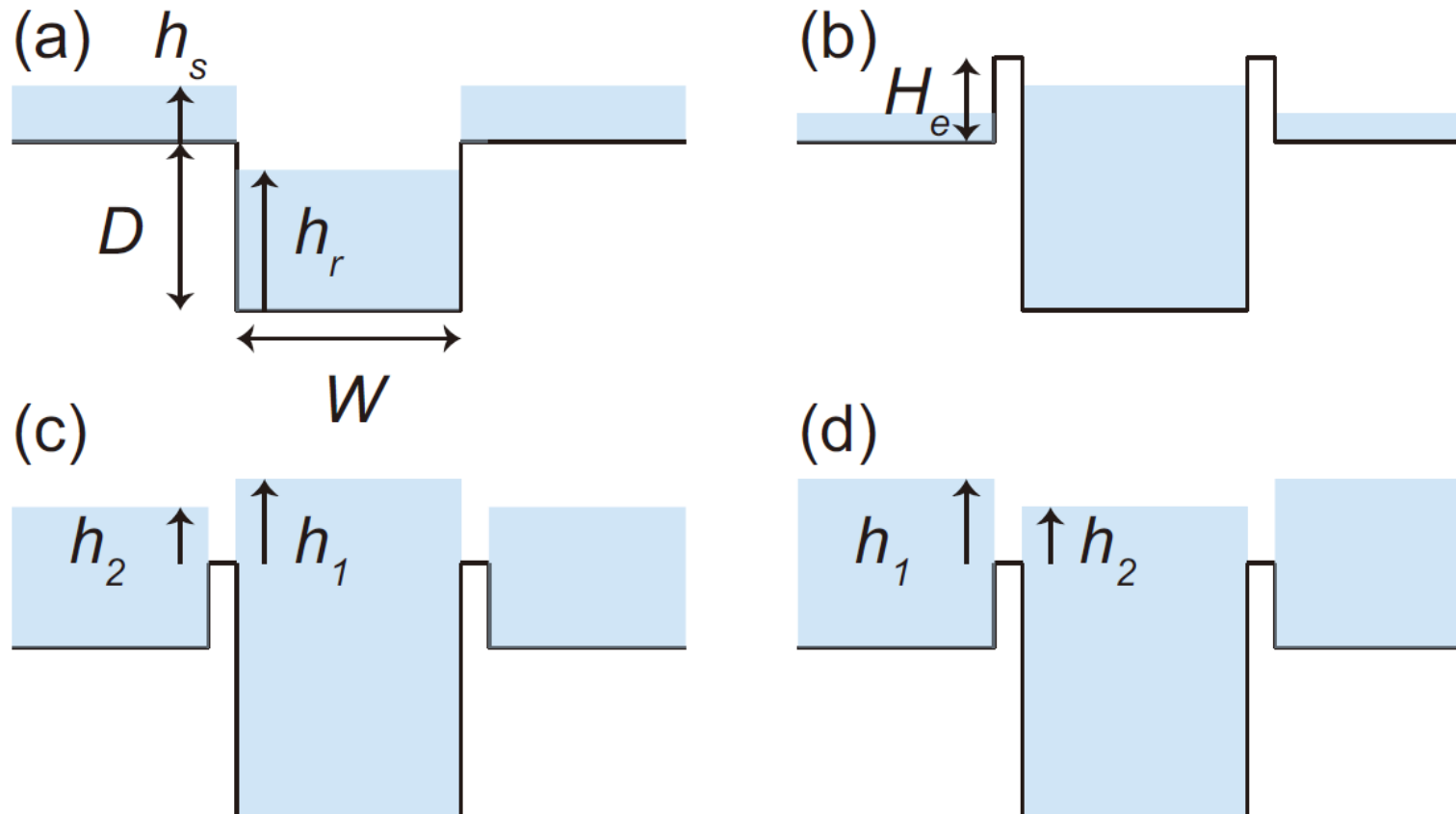
- ① 一体化： 降雨流出モデル、河道追跡モデル、洪水氾濫モデルを一体化することにより、低平デルタを含む広域の洪水現象を的確に再現（下図）
- ② 高速かつ安定的な数値アルゴリズム： 地形起伏の複雑な山地域でも高速に計算できる二次元拡散波近似式の変時間ステップアルゴリズム
- ③ 複雑な水文過程の反映： 平野部における鉛直浸透流、山地域における側方地中流、蒸発散と土壌の乾燥による蒸発抑制、ダムや放水路などの影響
- ④ 緊急対応のモデリングを実現するツール群とマニュアル整備： 衛星降雨や地形情報を活用するためのツール群、マニュアルとGUI（グラフィカルユーザーインターフェース）





各メッシュにおいて3種類の流れを自由に選択できる。

- 河道断面は矩形断面もしくはは堤防も含めて任意断面を設定可能。
- 越流公式を用いて、斜面部と河道部との水のやりとりを計算。
- 河道のあるグリッドセルで斜面と河川の水のやりとりを計算する。



□ 雨量データ

- 地上雨量計(local)
- 気象庁解析雨量, 気象庁降水短時間予報(resolution:1km)
- GSMaP (resolution:11km)
- 3B42RT (resolution:28km) etc.

□ 地形データ

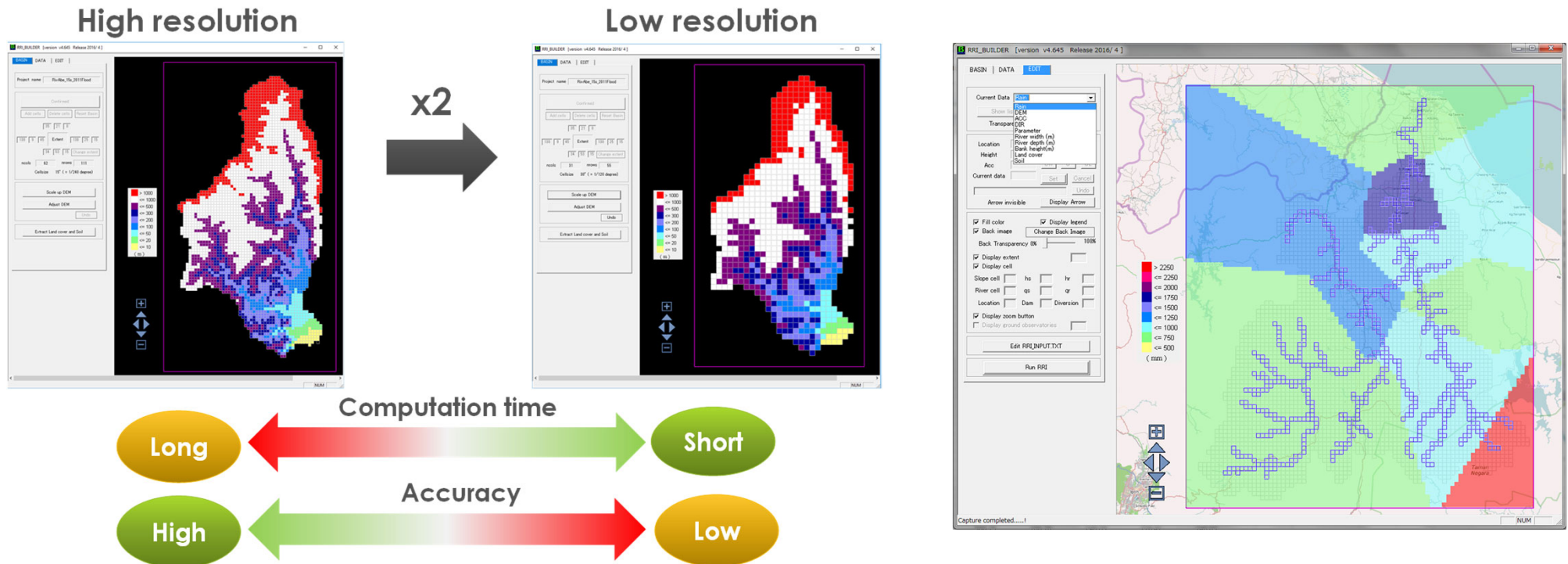
- Topographic map (local)
- 基盤地図情報 数値標高モデル(resolution:5m,10m)
- 日本域表面流向マップ(resolution:30m)
- HydroSHEDS (resolution:90,450,900m)
- GTOPO30 (resolution:900m)
- SRTM (resolution:90m) etc.

□ 土地利用データ, 地質データ

- Topographic map (local)
- 国土数値情報土地利用細分メッシュ(resolution:100m)
- GLOBAL LAND COVER CHARACTERIZATION (GLCC)
- Commission for the Geological Map of the World (CGWM) etc.

自動計算機能

- ・ 計算領域における解像度（メッシュサイズ）の調整。
- ・ ティーセン法による流域平均雨量の算出。
- ・ 窪み等による流れの不連続性をなくすためのDEM調整。
- ・ 河道における任意断面を設定可能。 **etc.**



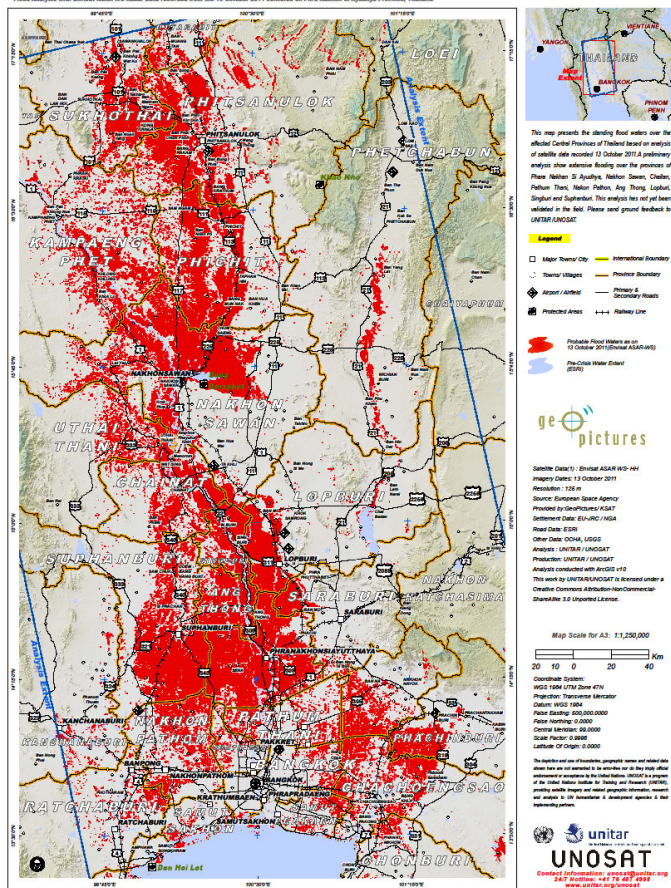
- RRIモデルは無償で公開されているソフトウェアです。
- 2016年6月の公開以降、**7160件**のダウンロード（2022年6月6日現在）
- 世界**80カ国以上**からダウンロード

The image shows a composite of two screenshots. On the left is a browser window displaying the 'RRI model Usage Advisory' page. The page title is 'RRI model' and the subtitle is '降雨流出氾濫(RRI)モデルプログラム利用許諾規約'. It lists terms of use, including that the software is provided free of charge and that users must agree to the terms. The page also includes a contact form with fields for 'Eメール:' and '国名:' and an 'Agree' button. On the right is the cover of the 'RRI-GUI 操作マニュアル' (RRI-GUI Operation Manual). The cover features the title 'Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) Model' and the version 'ver. 1.4.2'. It also lists the authors: 'International Center for Water Hazard and Risk Management (ICHARM) Public Works Research Institute (PWRI)' and 'Disaster Prevention Research Institute (DPRI), Kyoto University', along with the name 'Takahiro SAYAMA'.

国名	対象流域	年	プロジェクト
タイ	チャオプラヤ川流域 (160,000km ²)	2013	JICA SOUSEIプログラム (文部科学省)
パキスタン	インダス川流域 (400,000km ²)	2014	UNESCO SOUSEIプログラム (文部科学省)
フィリピン	パンパンガ川流域 (10,434km ²)	2014	技術支援 (アジア開発銀行) SOUSEIプログラム (文部科学省)
インドネシア	ソロ川流域 (16,100km ²)	2015	SOUSEIプログラム (文部科学省)
カンボジア	メコン川下流域	2015	SOUSEIプログラム (文部科学省)
マレーシア	ケランタン川流域 (11,900km ²)	2015	SATREPSプログラム (JST/JICA)
日本	阿賀野川流域 (900km ² /7,700km ²)	2014~	土木研究所
	花月川流域 (大分県日田市) (136km ²)	2017~	土木研究所

2011年にタイ国チャオプラヤ川において発生した洪水は、世界銀行の報告書によると同国に
800名以上の死者，約400億ドル以上の経済被害という甚大な被害をもたらした。

UPDATE2: OVERVIEW OF FLOOD WATERS OVER CENTRAL PROVINCES, THAILAND



衛星から推定した洪水範囲
 (2011年10月13日時点)

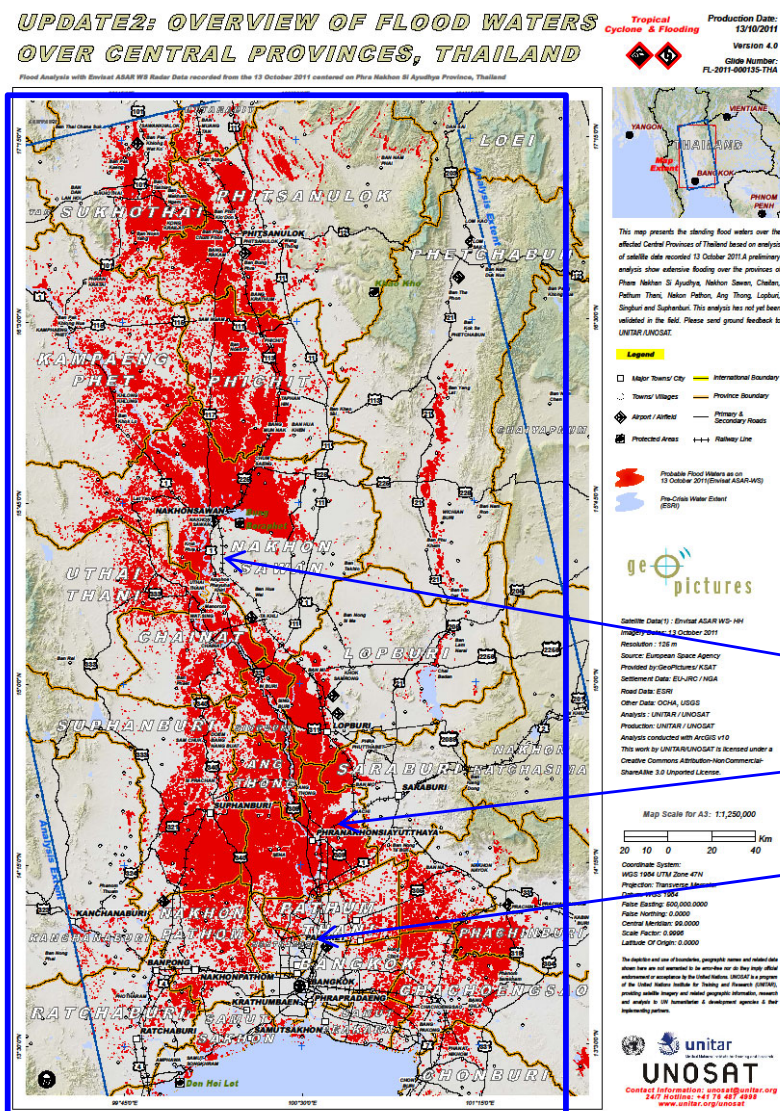


チャオプラヤ川洪水災害(破堤)の状況
 (JICAのHPから引用<https://www.jica.go.jp/oda/project/1103372/index.html>)

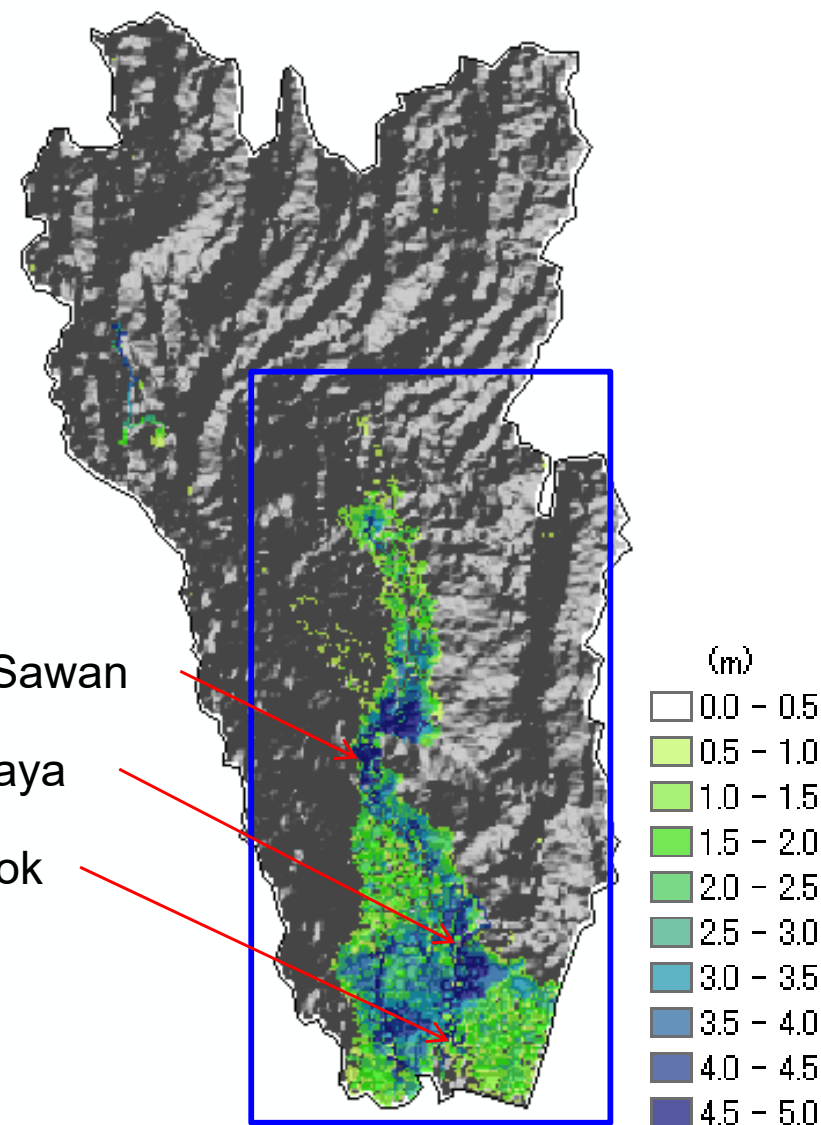


工業団地の浸水状況
 (航空写真 by ICHARM スタッフ)

衛星から推定した洪水範囲
 (2011年10月13日時点)

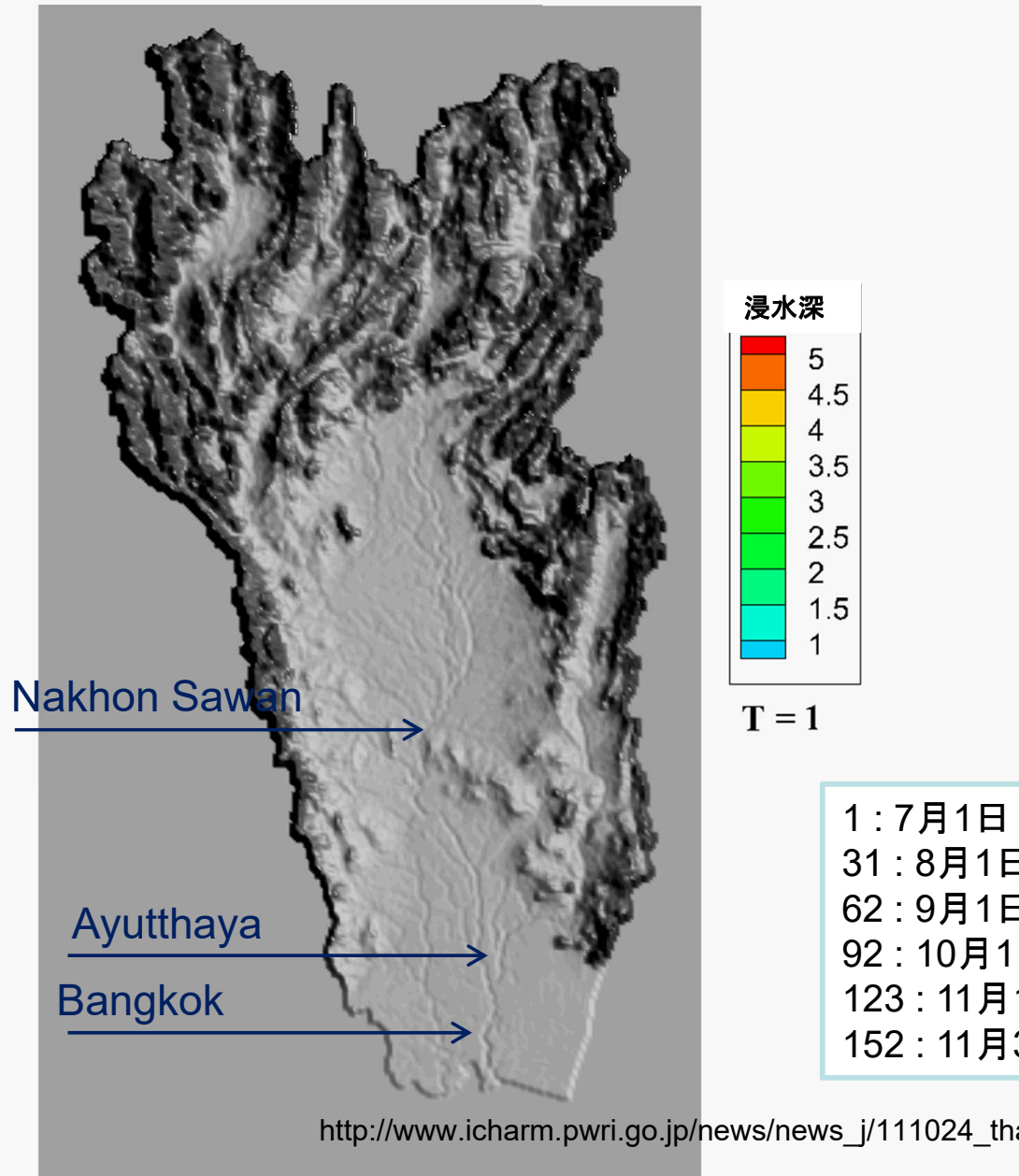


RRIモデルにより計算された浸水深
 (2011年10月13日)



RRIモデルによる予測 2011年タイ洪水 (2011/10/14実施)

Simulation Domain : 163,293 km²
Grid Size : 60sec (1776 x 1884 m)
Simulation Period:
2011/07/01 – 2011/11/30
Input Rainfall:
✓2011/07/01 – 2011/10/14
3B42RT (Satellite Based Rainfall)
(Every 3hours, Spatial Resolution: 0.25 deg)
✓2011/10/14 – 2011/10/21
JMA- GSM Weekly Weather Forecasting
(Forecasting Lead Time: 8 days, Update
every 12 hours)
✓2011/11/15 – 2011/11/30
(Previous year's 3B42RT rainfall in the same
period)



洪水による被害を軽減するためのBCP策定に向けた高解像度RRIモデルの構築

【解析の特徴】

- 空間解像度：40 m
- 流域モデルの結果を周囲境界条件として与える

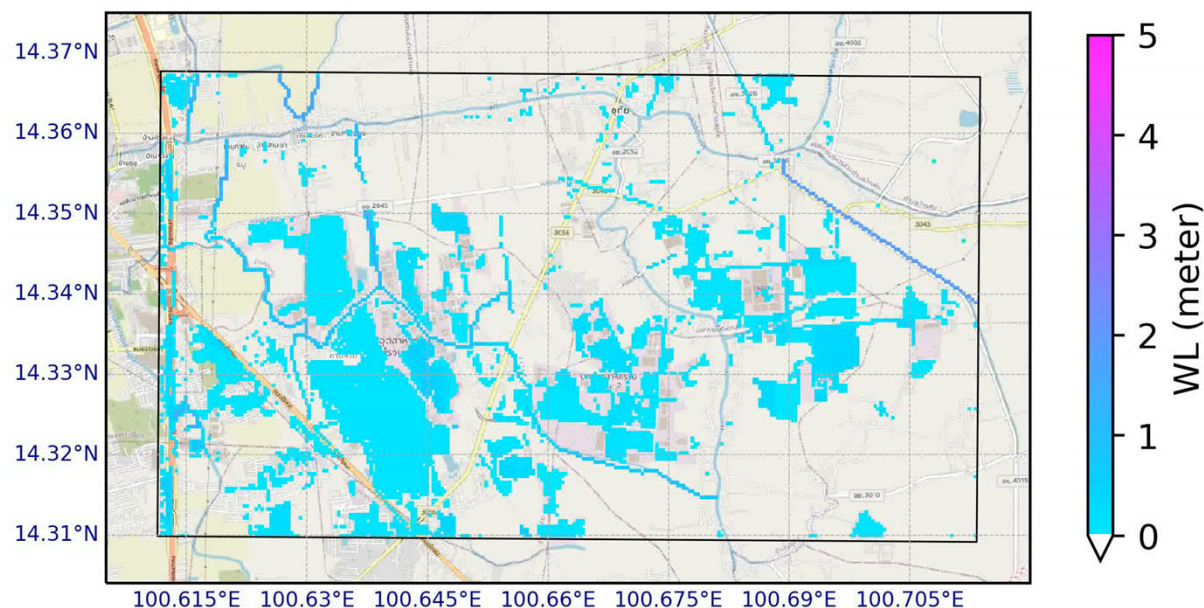
工業団地から約170km上流のナコンサワン地点の観測流量



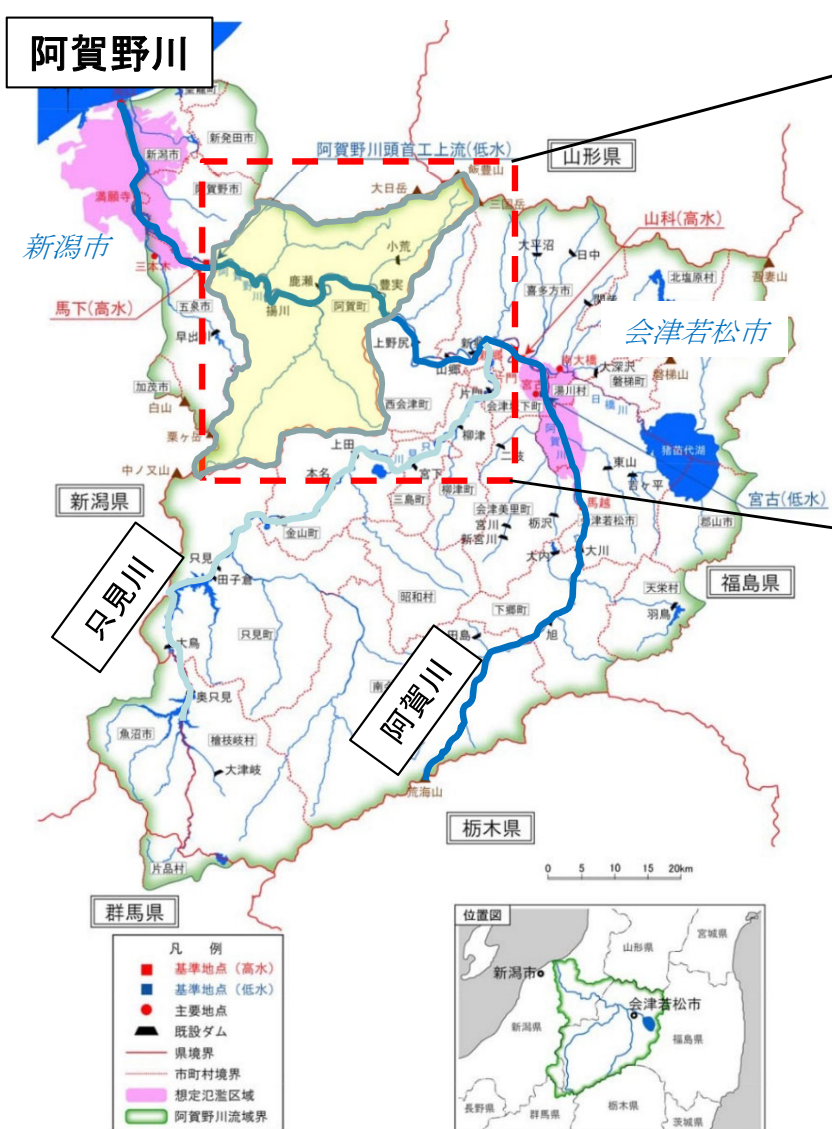
2011-07-01



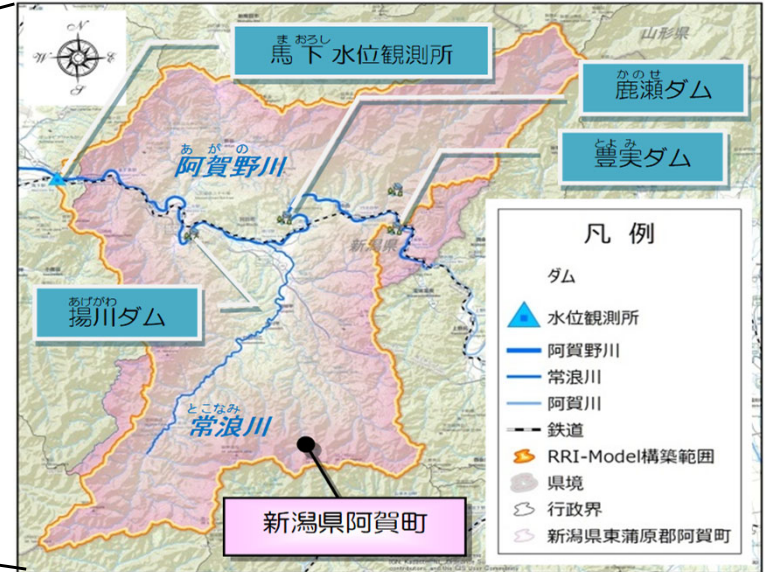
2011年工業団地の浸水状況
(航空写真 by ICHARM スタッフ)



高解像度氾濫解析結果



阿賀野川流域概要図 (流域面積約7,700km²)



阿賀町位置図
 (面積約900km²、阿賀野川延長45km)

様々な課題

- 阿賀野川沿いの中山間地に位置する洪水頻発地域 (H16,H23)
- 高い高齢化率 (45.6% : 新潟県内1位)
- 平成17年4月に4町村が合併し、広い市域 (新潟県内3位)
- 県管理区間河川のため洪水予測などが行われていない

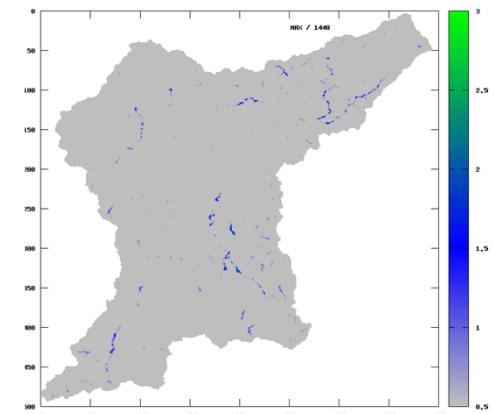


平成23年7月洪水の様子 (左：阿賀町役場三川支所付近、右：谷沢地区)

過去の豪雨災害時を含む5つの降雨・流量パターンをRRIモデルに入力し、阿賀町における氾濫状況（氾濫域、水位上昇速度など）を計算

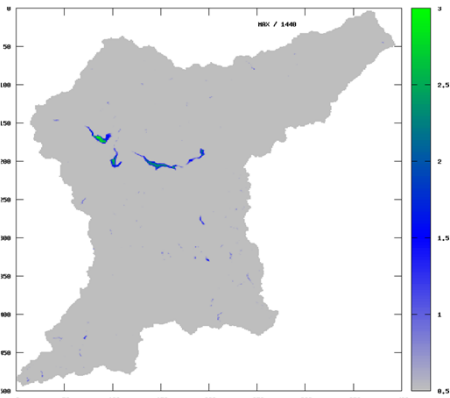
降雨・流量パターンを5パターン設定

降雨	H23年実績降雨	想定最大外力相当降雨※	ゲリラ豪雨※※
豊実ダム放流量 (モデル最上流)			
H23年実績放流量 (約7,500m ³ /s)	○ パターン1	○ パターン2	
河川整備基本方針引き延ばし 流量(約9,800m ³ /s)	○ パターン3	○ パターン4	
平常時流量 (約360m ³ /s)			○ パターン5

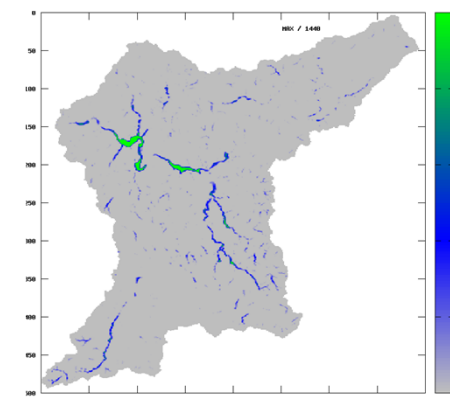


パターン5
(ゲリラ豪雨)

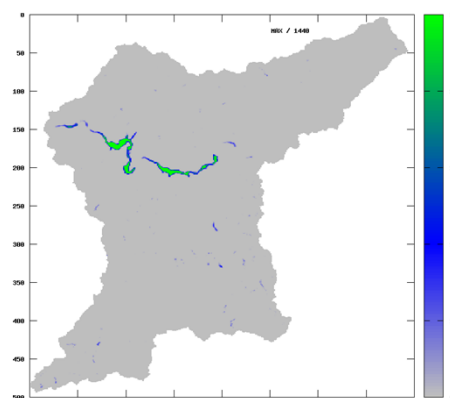
最大浸水深計算結果 (パターン1~5)



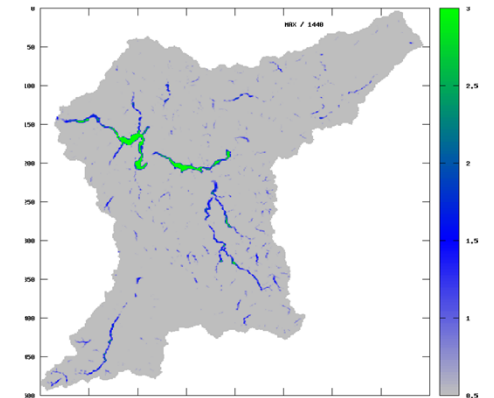
パターン1
(H23降雨、H23放流量)



パターン2
(H23降雨×2.5倍、H23放流量)



パターン3
(H23降雨、引延し放流量)



パターン4
(H23降雨×2.5倍、引延し放流量)

阿賀町における阿賀野川沿川19地区を対象に「洪水カルテ」を作成し「洪水ホットスポット」を特定

例)地区Pに対する「洪水カルテ」

降雨・流量パターン	パターン1	パターン2	パターン3	パターン4	パターン5
危険度評価軸					
①.避難のための時間を考慮した危険度評価	d	d	a	a	d
②.人的被害を考慮した危険度評価	d	c	b	a	d
③.避難所を考慮した危険度評価	d	d	d	b	d
④.災害時要配慮者を考慮した危険度評価	b	b	b	b	b
⑤.避難が必要な期間を考慮した危険度評価	d	d	c	b	d
①～⑤を合計 (aa:4点、a:3点、b:2点、c:1点、d:0点)	2	3	8	12	2
ランク換算(10点以上:A評価、7～9点:B評価、6点以下:C評価)	C	C	B	A	C



洪水カルテの作成対象とした阿賀野川に面する19地区
(ここでは地区A～Sと表記)

全19地区の「洪水カルテ」

降雨・流量パターン	パターン1	パターン2	パターン3	パターン4	パターン5	総合評価
流域平均降雨	H23実績降雨	想定最大外力相当降雨	H23実績降雨	想定最大外力相当降雨	ゲリラ豪雨	(A:35点以上、B:25点以上、C:24点以下)
豊実ダム放流量	H23実績降雨実績放流量	H23実績降雨実績放流量	基本計画引伸ばし放流量	基本計画引伸ばし放流量	平常時流量	
地区A	9	10	9	10	11	49
地区B	2	2	2	2	2	10
地区C	5	5	5	5	5	25
地区D	8	10	9	9	3	39
地区E	1	3	1	3	2	10
地区F	4	12	11	12	3	42
地区G	3	3	3	3	3	15
地区H	4	7	4	7	7	29
地区I	3	6	3	5	8	25
地区J	1	1	1	1	1	5
地区K	4	9	5	9	5	32
地区L	3	5	5	12	5	30
地区M	3	3	3	3	3	15
地区N	1	3	4	4	2	14
地区O	3	3	3	3	3	15
地区P	2	3	8	12	2	27
地区Q	11	11	11	13	5	51
地区R	10	10	12	10	4	46
地区S	4	12	14	12	4	46

地区A,D,F,Q,R,Sの6つの地区 = 「洪水ホットスポット」

本結果に対する阿賀町担当者のコメント

- 本研究結果は、**おおむね肌感覚に合っている**。
- 地区代表点は、地域住民の合意を得た上で、**住民の感覚に沿うような場所を設定する必要がある**。

- RRIモデルをベースにした
流域土砂・流木流出解析モデルの開発
- 中小河川におけるデータ同化をRRIモデルに組み込んだ
リアルタイム水位予測システムの構築

RRIモデルをベースにした流域土砂・流木流出解析モデル

Rainfall-sediment-runoff (RSR) model

○近年の水災害の主な特徴と課題

- 河床上昇により土砂と洪水が同時に氾濫し土砂が広範囲に堆積する「土砂・洪水氾濫」等が顕在化（H29赤谷川、H30広島県など）
- 市町村から避難情報や防災情報は出されていたものの、逃げ遅れによる人的被害が発生

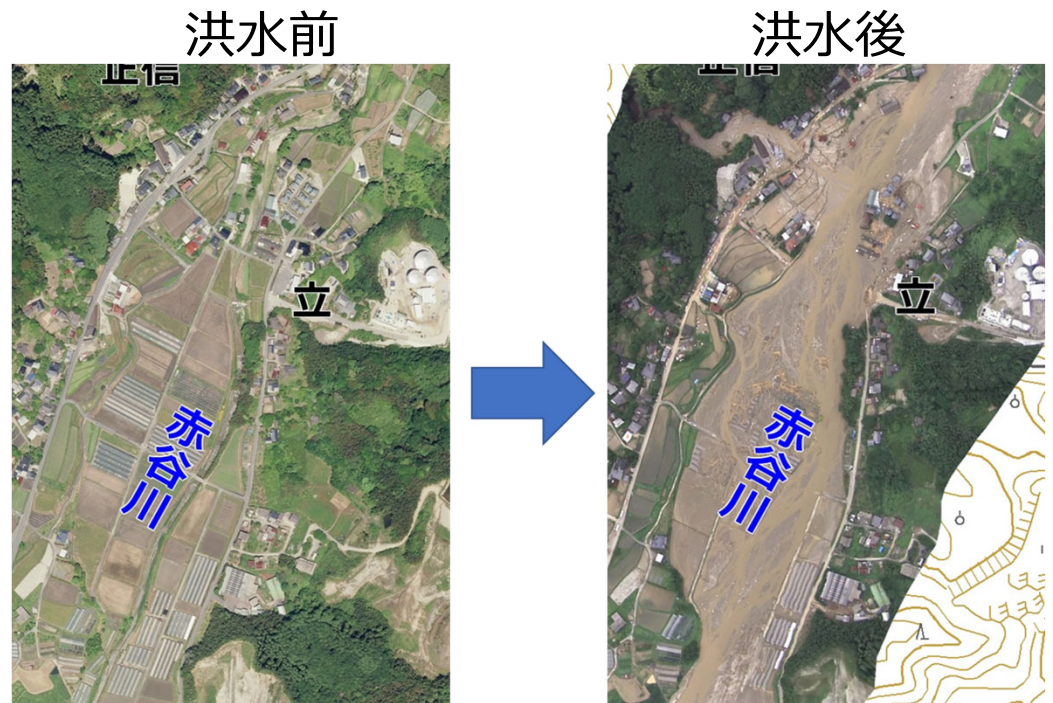


洪水後市街地に土砂が堆積している様子



2017年九州北部豪雨_流木が堆積している様子

(https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H29hukuoka_oita-heavyrain.html)



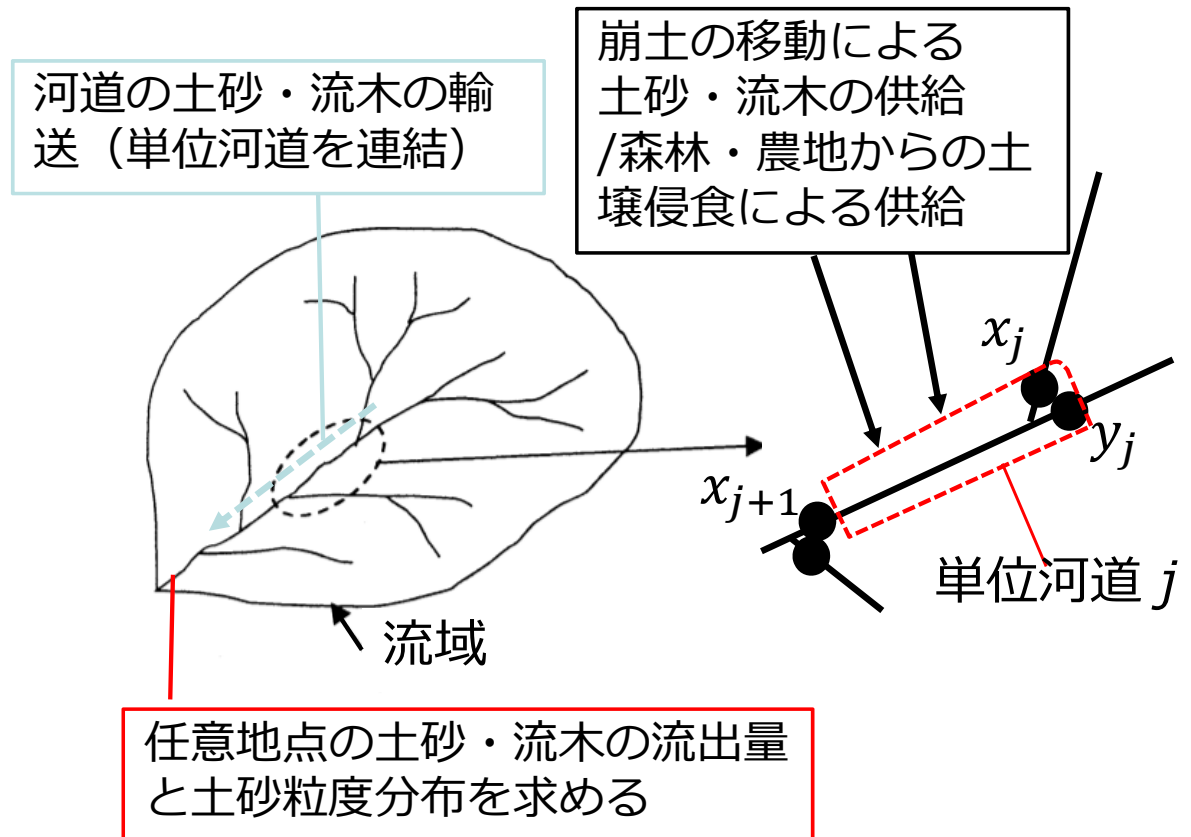
2017年九州北部豪雨 赤谷川

◆ 豪雨時に流域から流出する土砂・流木を時系列で求められる手法を開発

・ RRI モデルの斜面セルで斜面安定解析を行い、崩壊の発生による土砂供給、もしくは森林・農地からの土壌侵食による土砂供給量を求める。

・ 斜面から供給される土砂が河道に到達すれば、土砂・流木は図のように合流点間を1単位とする河道（単位河道）に流入する。

・ 単位河道を直列及び並列に配置することによって流域全体の土砂・流木の流出計算を行う。

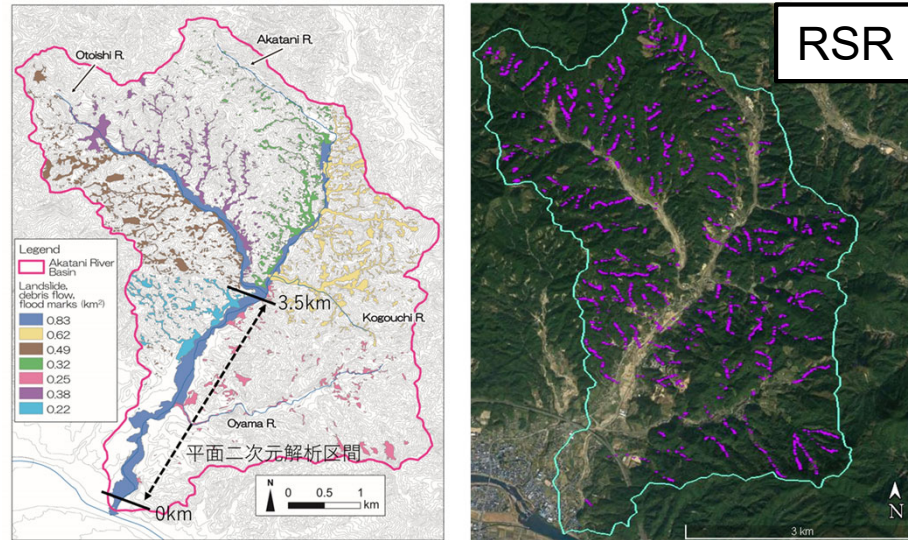


単位河道の河床位の変化：

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = \sum_i \frac{1}{(1-\lambda)B_j L_j} \{ Q_{bi}(x_j) + Q_{bi}(y_j) - Q_{bi}(x_{j+1}) + \underbrace{Vp_{vi}}_{\text{崩土の移動による土砂の流入}} \} - E_i + D_i \quad (1)$$

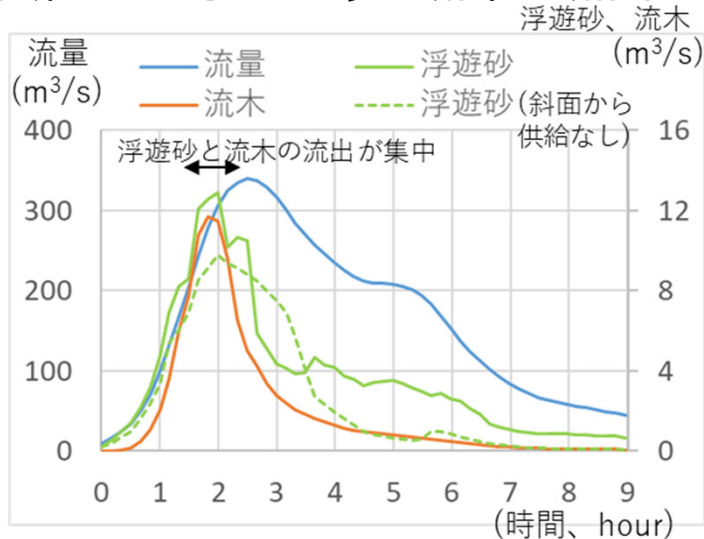
崩土の移動による土砂の流入

流域の崩壊発生状況：実際（左）と計算（右）の比較

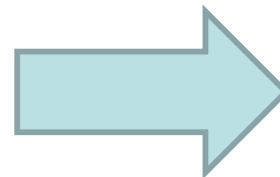


* 計算の土砂移動痕跡は、河道部分を除くもの

流域からの水、土砂、流木の流出：



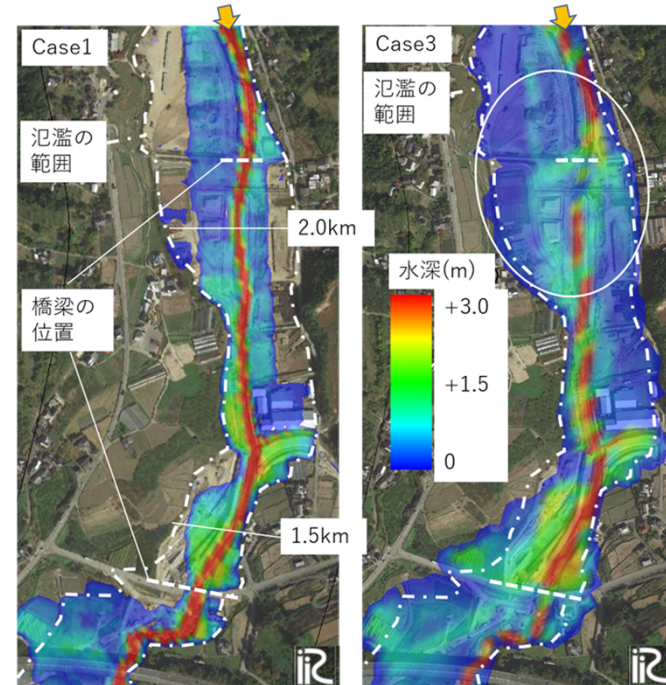
境界条件として平面二次元解析を実施



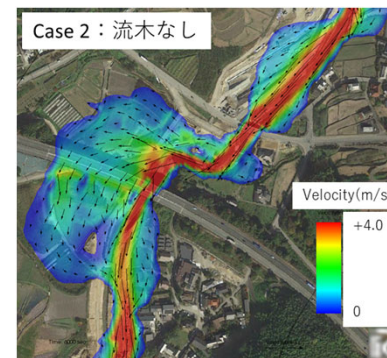
下流河道では、多量の土砂・流木が流出した後に流量のピークを迎えることになる。

流れのみ 土砂・流木を考慮

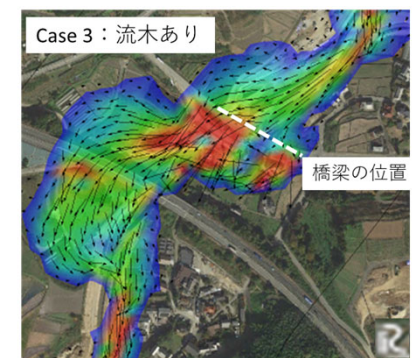
ピーク流量時の水深コンター



流木なし



流木あり



流木の橋梁捕捉が洪水流に及ぼす影響を評価可能 20

研究背景

(官民研究開発投資拡大プログラム:PRISM)

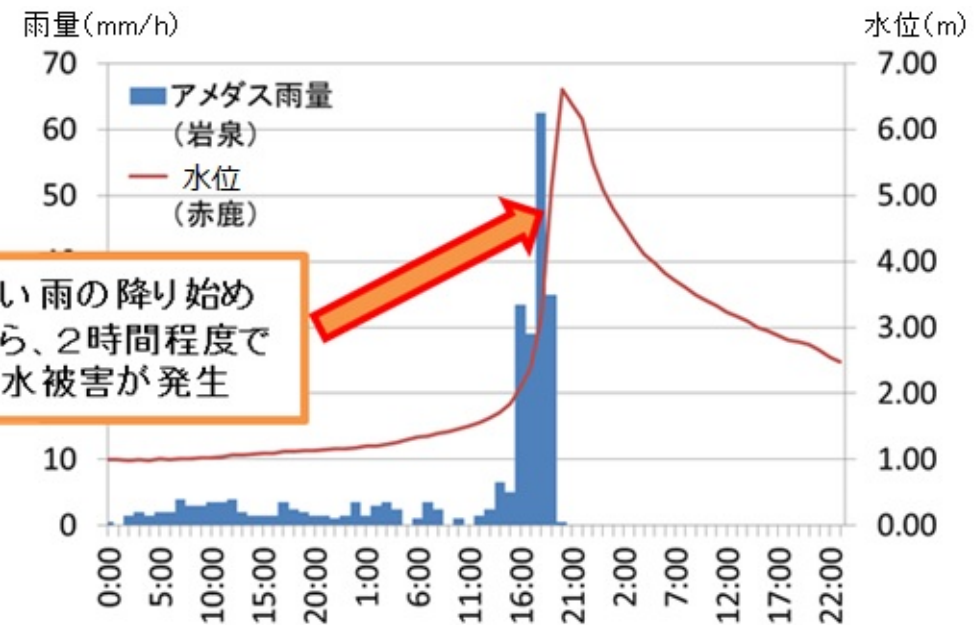
- ◆ 2016年台風10号の際には、岩手県岩泉町を流れる小本川では、急激な水位上昇。避難勧告が発令される前に洪水が発生。
- ◆ **高齢者グループホーム9名の入所者全員が避難できず、溺死。**

死者9名が出た
高齢者グループホーム

隣接する老人保健施設では、入所者
約20名全員が無事であった



H28.9.3東北地方整備局撮影



強い雨の降り始め
から、2時間程度で
浸水被害が発生

2016年台風10号による小本川の雨量・水位変化
(8月29～30日)

この時小本川では**2時間**で水位が約**3.5m**上昇した。
⇒急激な水位上昇による中小河川特有の洪水災害が顕在化

研究背景

(官民研究開発投資拡大プログラム:PRISM)

- ◆ 全国の約21,000河川のうち、避難指示等の重要な判断要素となる水位予測が行われているのは大河川を中心とする約400河川のみ。残りの大部分の中小河川では水位予測は行われていない。
- ◆ 沿川人口が多く、洪水により重大な損害が生じるおそれがあるものの、水位予測を実施できていない中小河川が約1,500河川。 これらの河川においても、住民の確実な避難のためには水位予測を行う必要。

2019年台風19号 宮城県丸森町の被害状況

○決壊河川（県管理）

内川10カ所、新川4カ所、五福谷川4カ所

○人的被害 **いずれも水位予測を行っていない河川**
死者10名、行方不明者1名、ケガ2名

○住家被害

全壊113件、大規模半壊246件、半壊623件、
一部損壊310件、床上浸水866世帯、
床下浸水207世帯

※丸森町HPより



2019年東日本台風災害でも、水位予測を行っていない中小河川において犠牲者を伴う人的被害が発生

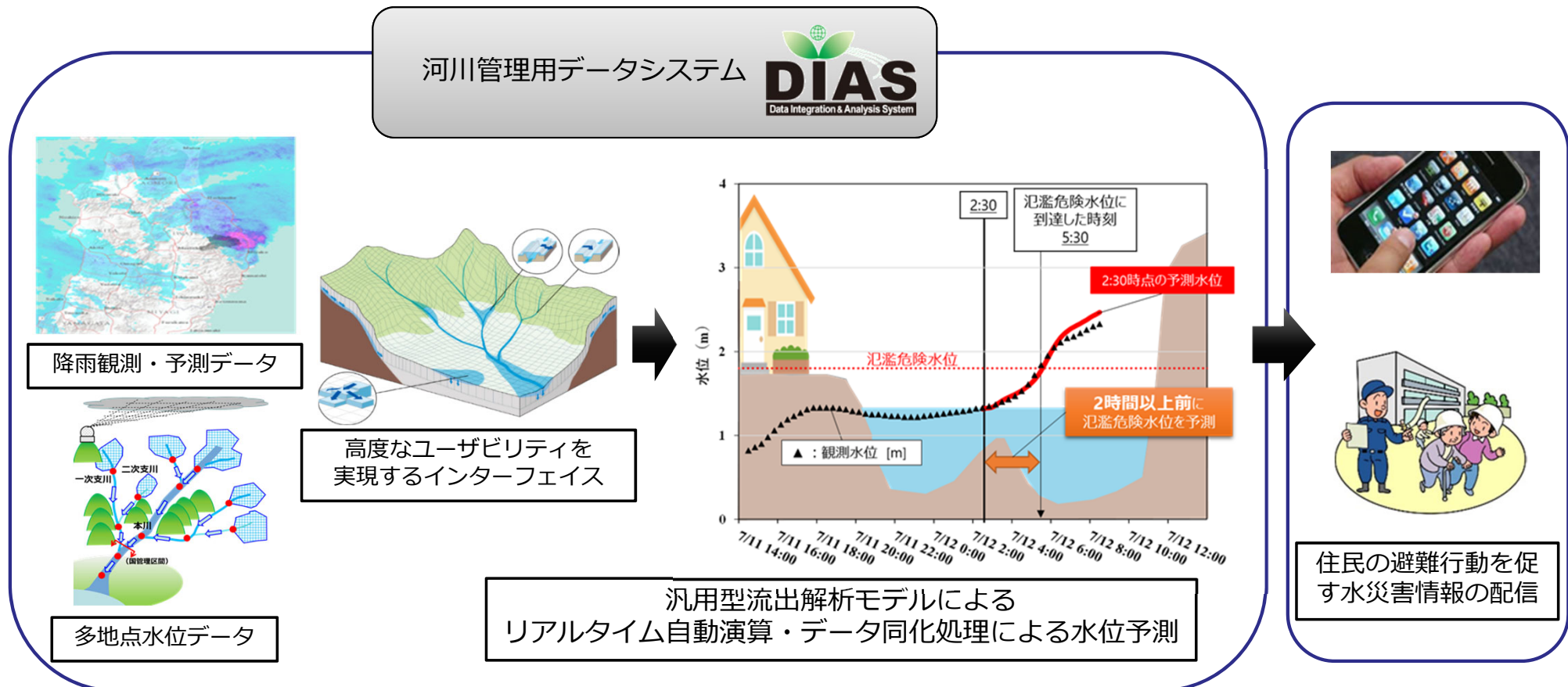
流木・土砂により被災した家屋



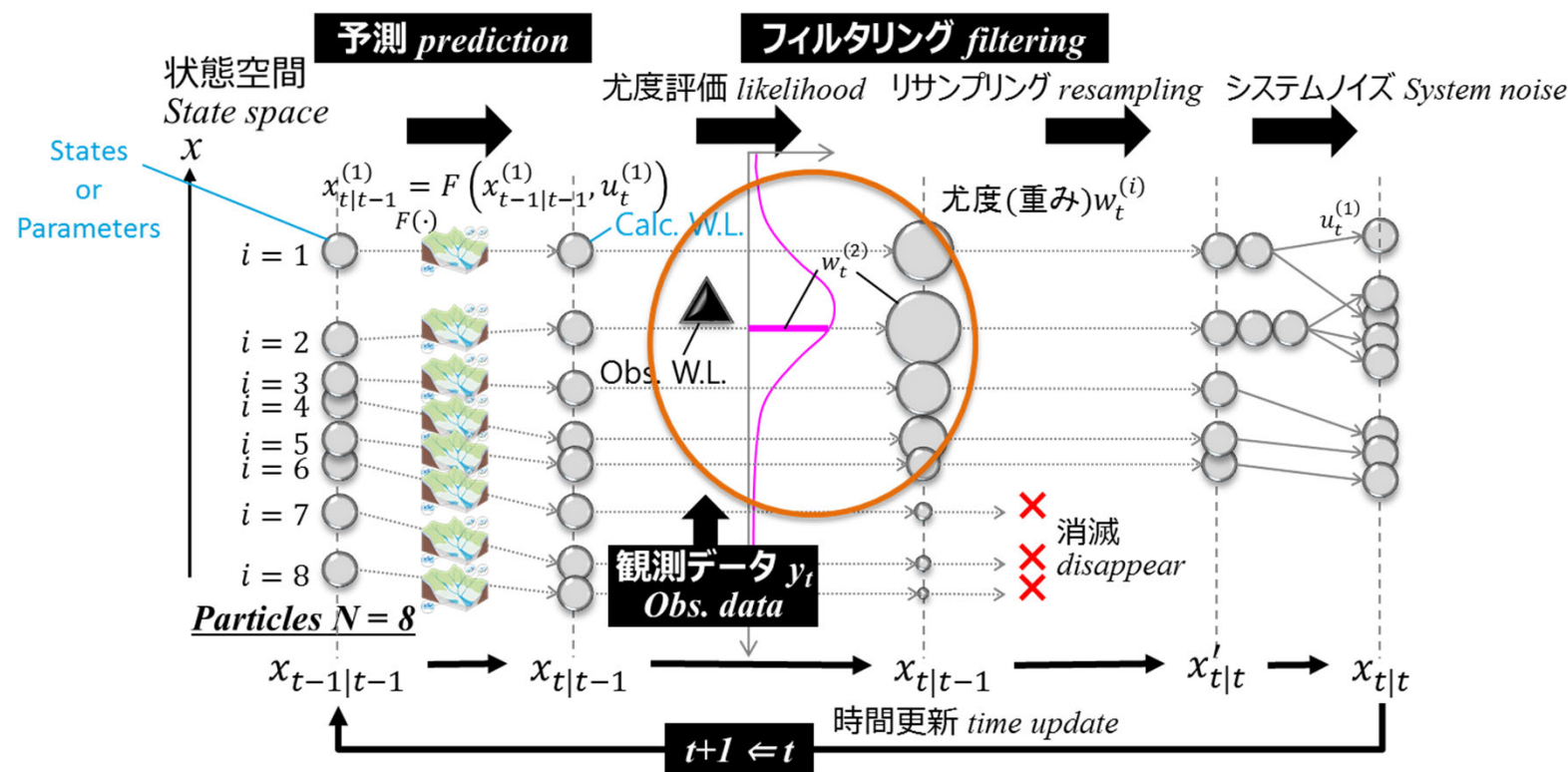
(官民研究開発投資拡大プログラム:PRISM)

目標

- ◆洪水時の住民避難を支援するため、**「住民避難が必要な河川水位にいつ到達するか」に着目した水位予測モデルの開発を行う。**
- ◆中小河川においても導入しやすい、汎用性のある**「短時間で計算可能な」、「安価」、「簡便」、「必要な精度」**を有する水位予測システムを開発し体系化する。
- ◆上記の水位予測データ等を用いて、住民の避難行動を促す水災害情報を配信するための手法等についても開発する。



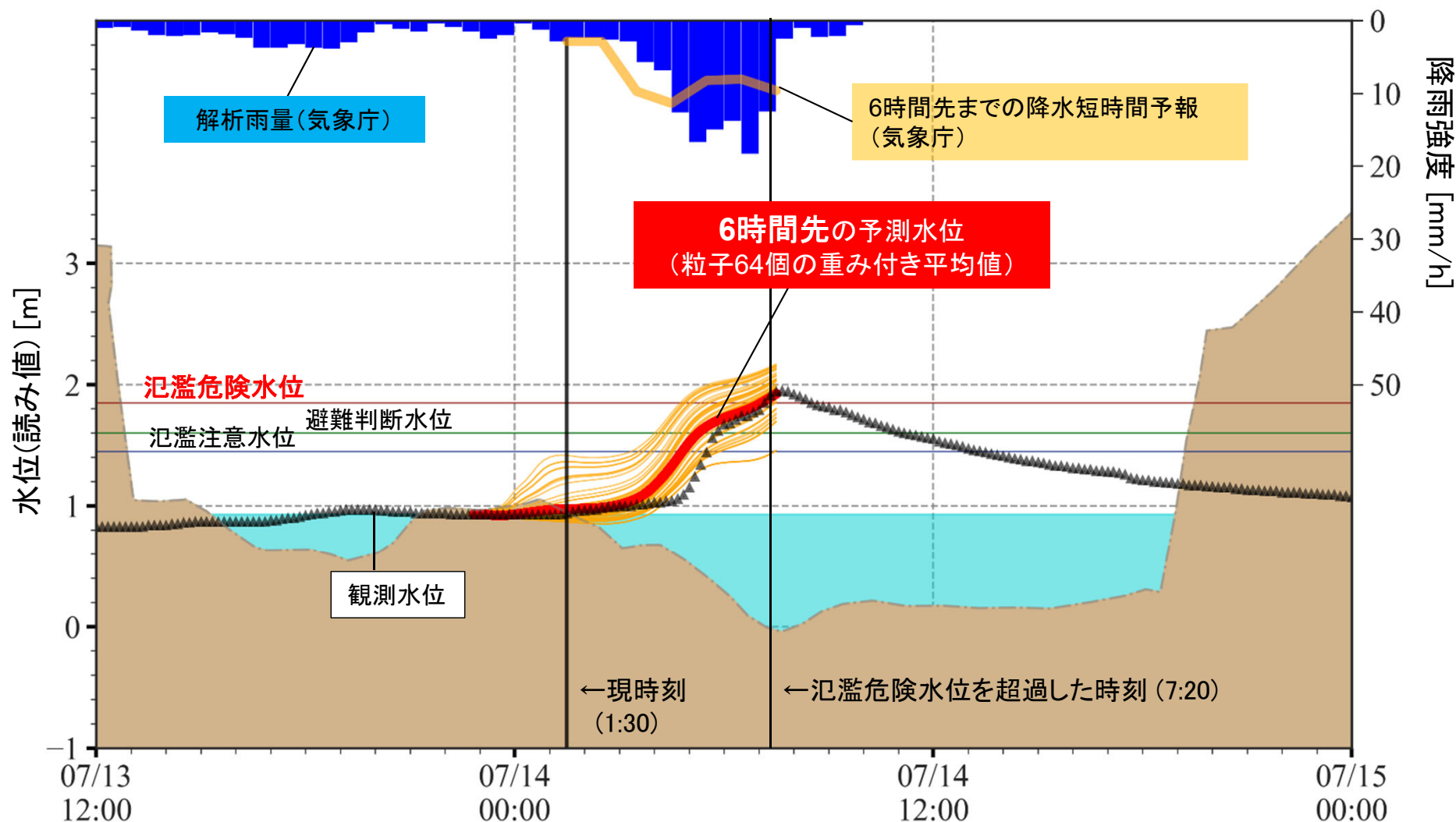
- ◆ 水位予測モデルの精度向上のため、リアルタイムの水位観測データを用いて水位予測モデルを逐次修正する手法を採用。
- ◆ 流量等の状態量やパラメータへの適用が可能であり、応用性の高いデータ同化手法の一つである粒子フィルタを選定。
- ◆ RRIモデルの各パラメータ（河道粗度係数、透水係数、不透水層から水深）に適用したところ、不透水層からの水深に対して粒子フィルタを適用するのが最も効果的と評価。



粒子フィルターの概念図：観測値に近い粒子（ある状態量やパラメータによる計算結果）の重みを大きく、離れた粒子を小さく（又は消滅）することで、観測値と整合する状態量やパラメータの設定による予測計算を可能とする。

流域面積約60km²、流域における山地の割合が7割の中山間地河川

- ◆ 令和2年7月14日1:30の時点で、7時頃に氾濫危険水位の超過を予測。
- ◆ 実際に、令和2年7月14日7:20で、氾濫危険水位を超過。
- ◆ 結果的に、**5時間50分前**に氾濫危険水位の超過を予測できたことを確認。



- ◆ 令和4年度までに**構築予定の200河川を対象に**これまでに開発した手法の組み合わせによる**スタンダードモデルの設定**を行い、モデルの適用性を更に高める。
- ◆ また、一定精度を確保したスタンダードモデルに加え、**河川の特성에応じてオプションを選択する手法も含めた、中小河川における降雨流出解析モデルの構築マニュアルを作成。**

スタンダードモデル(案)		オプション(案)		
1	データ収集、変換 <ul style="list-style-type: none"> ・水位観測データの収集(可能な限り多くの洪水イベントを収集) ・対応する時期の雨量観測・予測データの収集、データの組み合わせ、変換 ・既往H-Q式、横断面データの収集 	1A	H-Q式がない	<ul style="list-style-type: none"> ・等流計算によるH-Q式の作成 ・モデル上でのH-Q関係の推定する方法 ・断面データの取得(簡易な断面の測量手法)
		1B	洪水イベント、洪水データが不足	<ul style="list-style-type: none"> ・同様の特性を持った河川の事例からパラメータを推定する方法
		1C	雨量プロダクトの組み合わせ	<ul style="list-style-type: none"> ・各種雨量プロダクトの組み合わせを変更する方法 ・高解像度ナウキャストの活用
2	ベースモデル構築 <ul style="list-style-type: none"> ・RRI-GUIによるRRIモデルの作成 ・危機管理型水位計を用いたデータ同化手法に応じた、モデル構築 	2A	レジーム則では地形を表現できない	<ul style="list-style-type: none"> ・測量データ、空中写真等を用いて、河道幅と水深を設定し、モデルに適用する方法
3	デフォルトパラメータによる解析 <ul style="list-style-type: none"> ・デフォルトパラメータの選択 ・既往洪水イベントによる精度検証 	3A	水田・畑の土地利用が多い	<ul style="list-style-type: none"> ・実際の土質地質を踏まえたデフォルトパラメータセットの選択
4	パラメータ最適化 <ul style="list-style-type: none"> ・SCE-UA法によるパラメータ最適化 ・既往洪水イベントによる精度検証 	4A	水田・畑の土地利用が多い	<ul style="list-style-type: none"> ・水田・畑をパラメータ最適化の対象とする方法
		4B	SCE-UA法の設定	<ul style="list-style-type: none"> ・洪水規模により最適化の対象期間等を変える方法
5	水位データ同化 <ul style="list-style-type: none"> ・粒子フィルターの基本設定 ・既存水位計と危機管理型水位計のデータを同時に同化する方法の適用 ・既往洪水イベントによる精度検証 	5A	洪水時の河床変動への対応	<ul style="list-style-type: none"> ・粒子フィルターに逐次H-Q式を推定するアルゴリズムを適用する方法
		5B	粒子フィルタの高度な設定	<ul style="list-style-type: none"> ・粒子フィルタを考慮したRRIのパラメータ設定 ・粒子フィルタの補正量の変更

ご清聴ありがとうございました。

問い合わせ先
suimon@pwri.go.jp