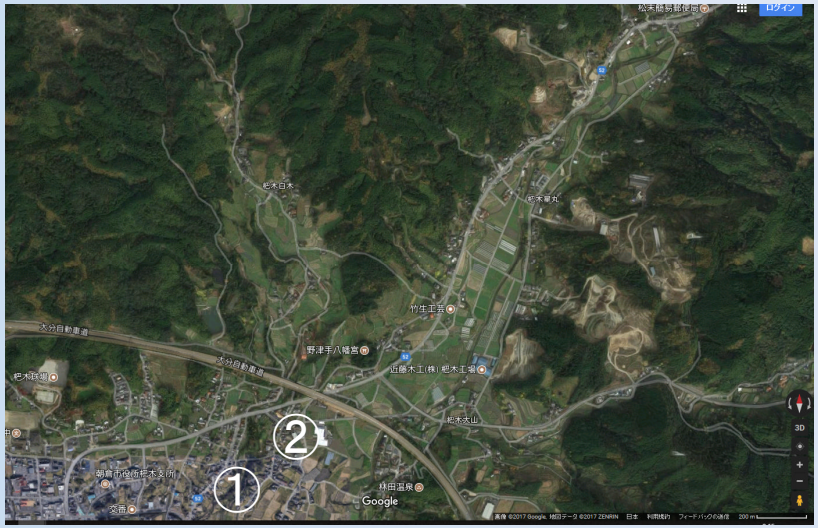
洪水予測の先端技術とリアルタイム浸水ハザードマッピング

京都大学防災研究所
佐山敬洋

平成27年9月九州北部豪雨による被害

国土地理院 UAVによる動画: 福岡県朝倉市 赤谷川の被害箇所1（平成29年7月7日15時00分撮影）
http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H29hukuoka_ooita-heavyrain.html

平成27年9月九州北部豪雨による被害(1)



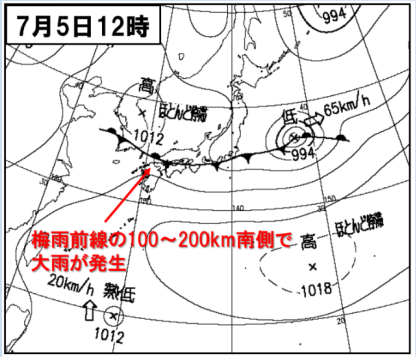
平成27年9月九州北部豪雨による被害(2)

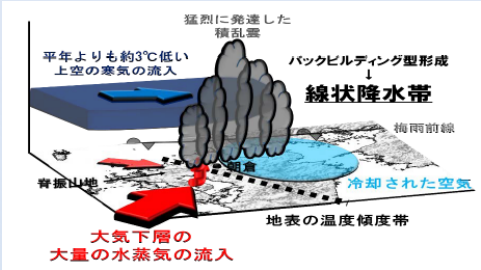
大分県日田市小野地区の土砂災害

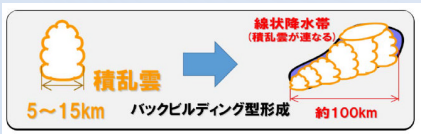
発生日時: 平成29年7月6日10時頃
家屋損壊7戸、浸水10戸
崩壊規模: 幅約200 m, 長さ300 m

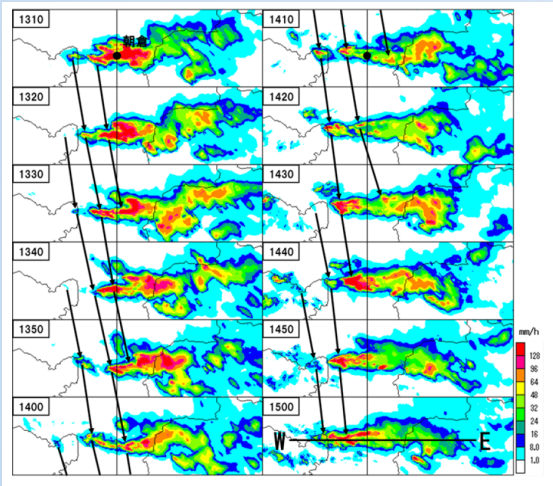
荷原川下流部の破堤・農業被害

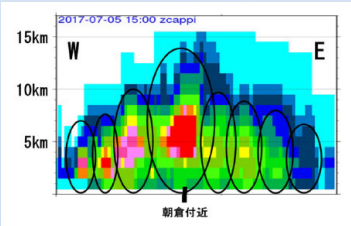
平成29年7月九州北部豪雨の気象要因







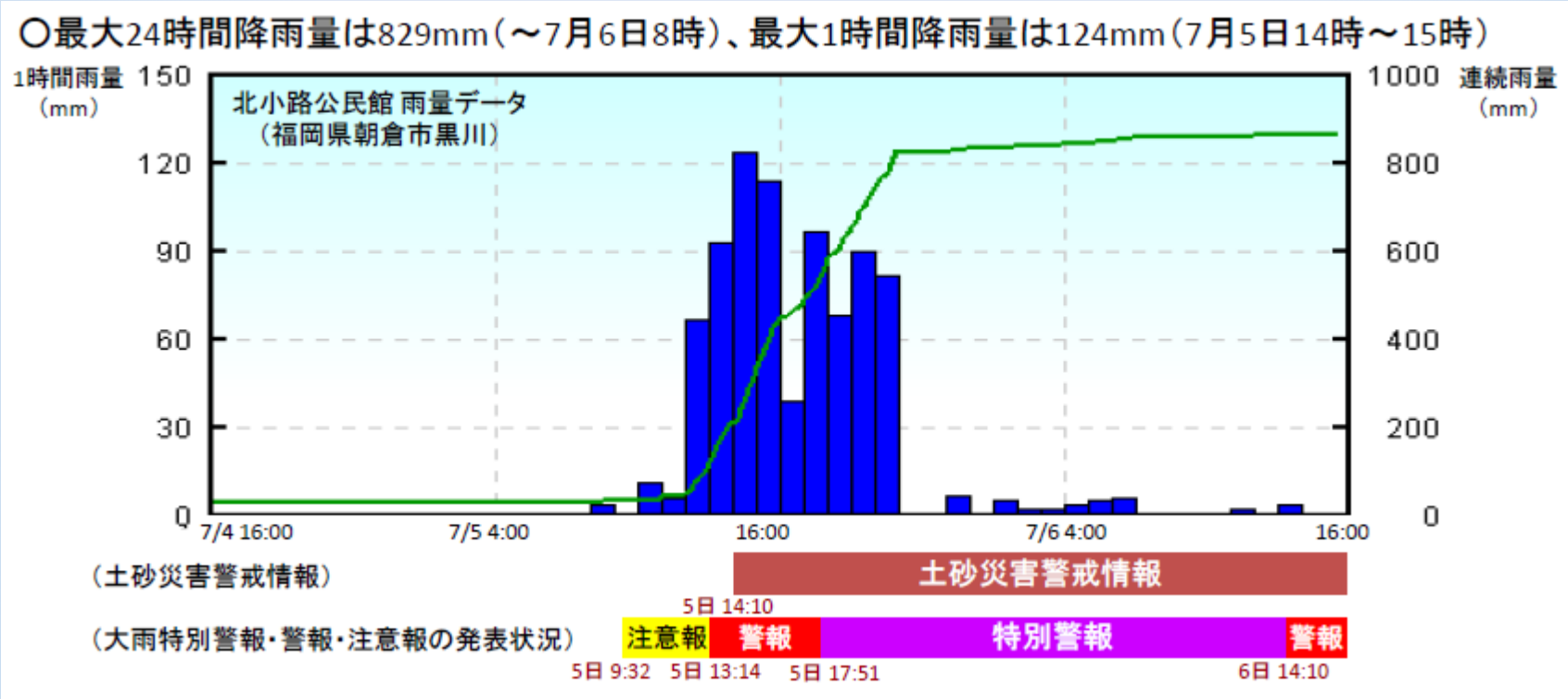




- 対馬海峡付近に梅雨前線が停滞。その南側100～200km(九州北部)の大気下層には、南西風により東シナ海から暖かく湿った空気が流入。
- 上空5,500 m付近には、平年よりも約3℃低い寒気が流入し、大気不安定の状態。
- 先行した降雨で冷却された空気により地表の温度傾度帯が強化され、背振山地の東側で積乱雲が次々と発生。
- それらが東西に連なることで線状降水帯を形成。

気象研究所：平成29年7月5-6日の福岡県・大分県での大雨の発生要因について、平成29年7月14日。

平成29年7月九州北部豪雨の降雨



国土交通省九州地方整備局：平成29年７月九州北部豪雨による土砂災害の概要＜速報版＞Vo. 6より

気象庁：7月5日17時51分に福岡県に大雨特別警報を発表。
「重大な危険が差し迫った異常事態です。… すでに外出が危険な場合には、家の中でも二階や崖の反対側などのより安全な場所に退避する等、身を守るため、最善を尽くしてください。」
(19時55分に福岡県に加えて、大分県にも大雨特別警報を発表。)

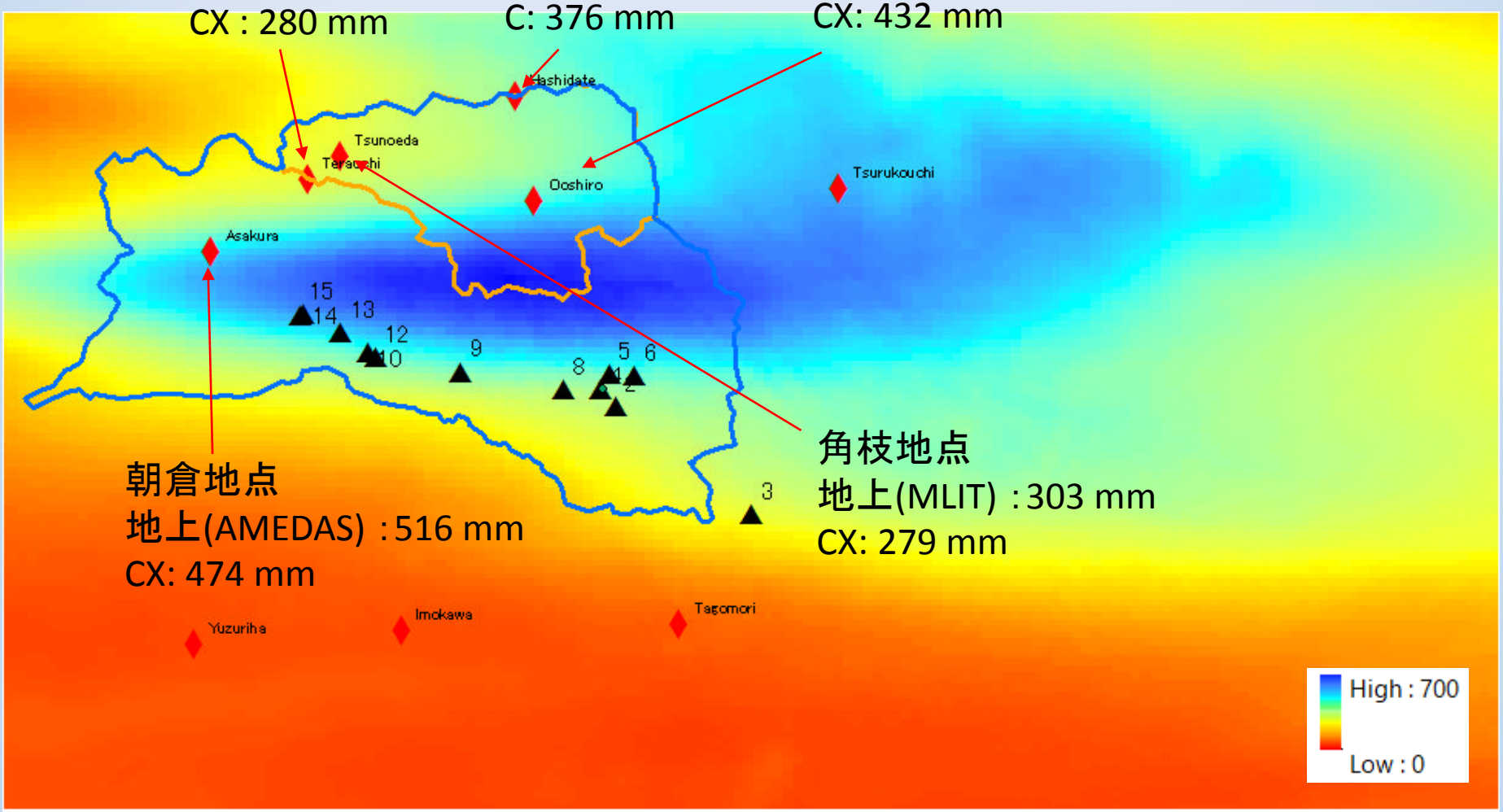
朝倉市: 15時半から杷木地区や甘木地区に避難指示を出した。

平成29年7月九州北部豪雨の降雨分布

寺内地点
地上：302 mm
CX：280 mm

箸立地点
地上：394 mm
C: 376 mm

大城地点
地上：461 mm
CX: 432 mm



朝倉地点
地上(AMEDAS)：516 mm
CX: 474 mm

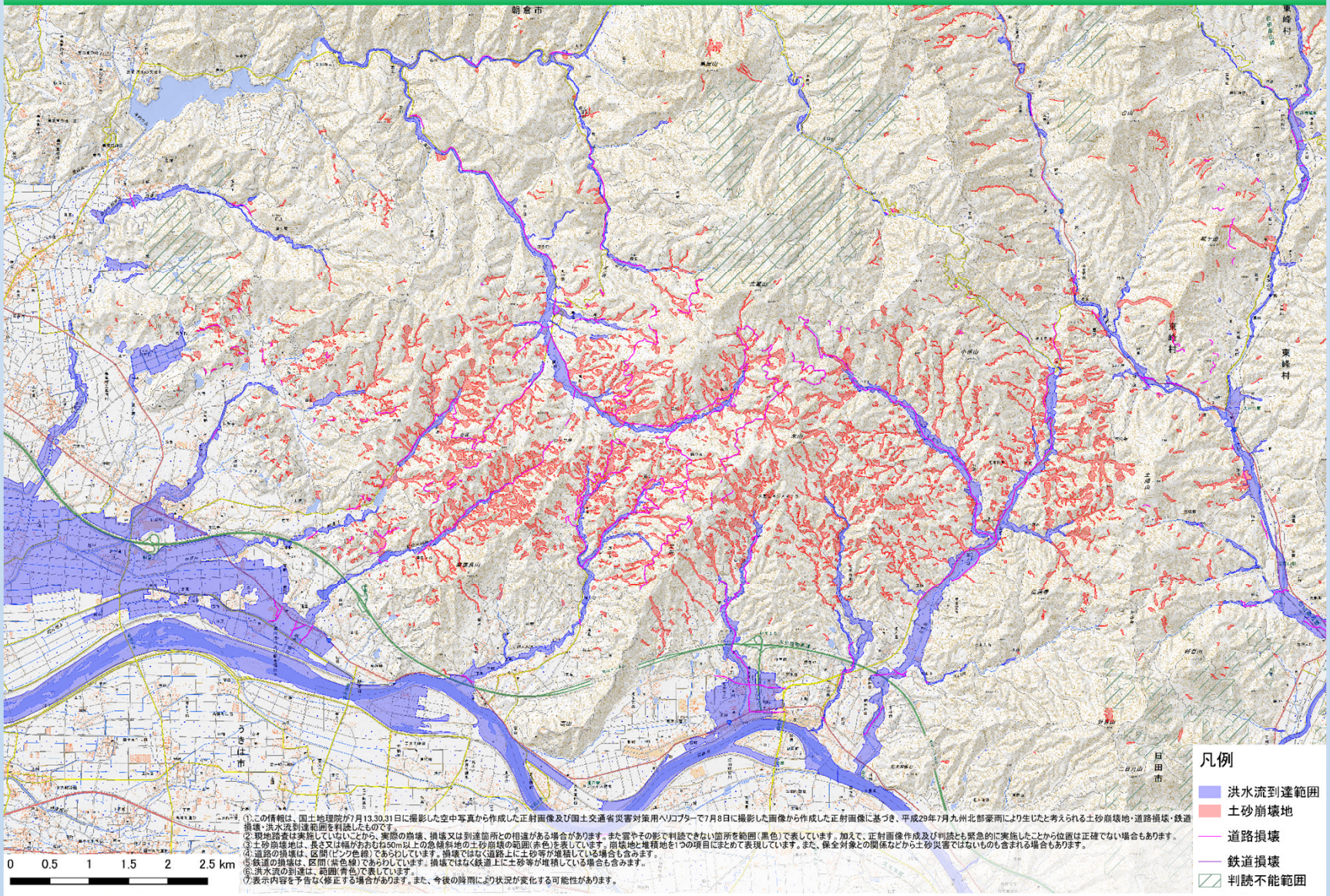
角枝地点
地上(MLIT)：303 mm
CX: 279 mm

Cバンド-Xバンドレーダ合成雨量（7/5 0:00-7/6 0:00積算分布）

最大値: 698.1 mm

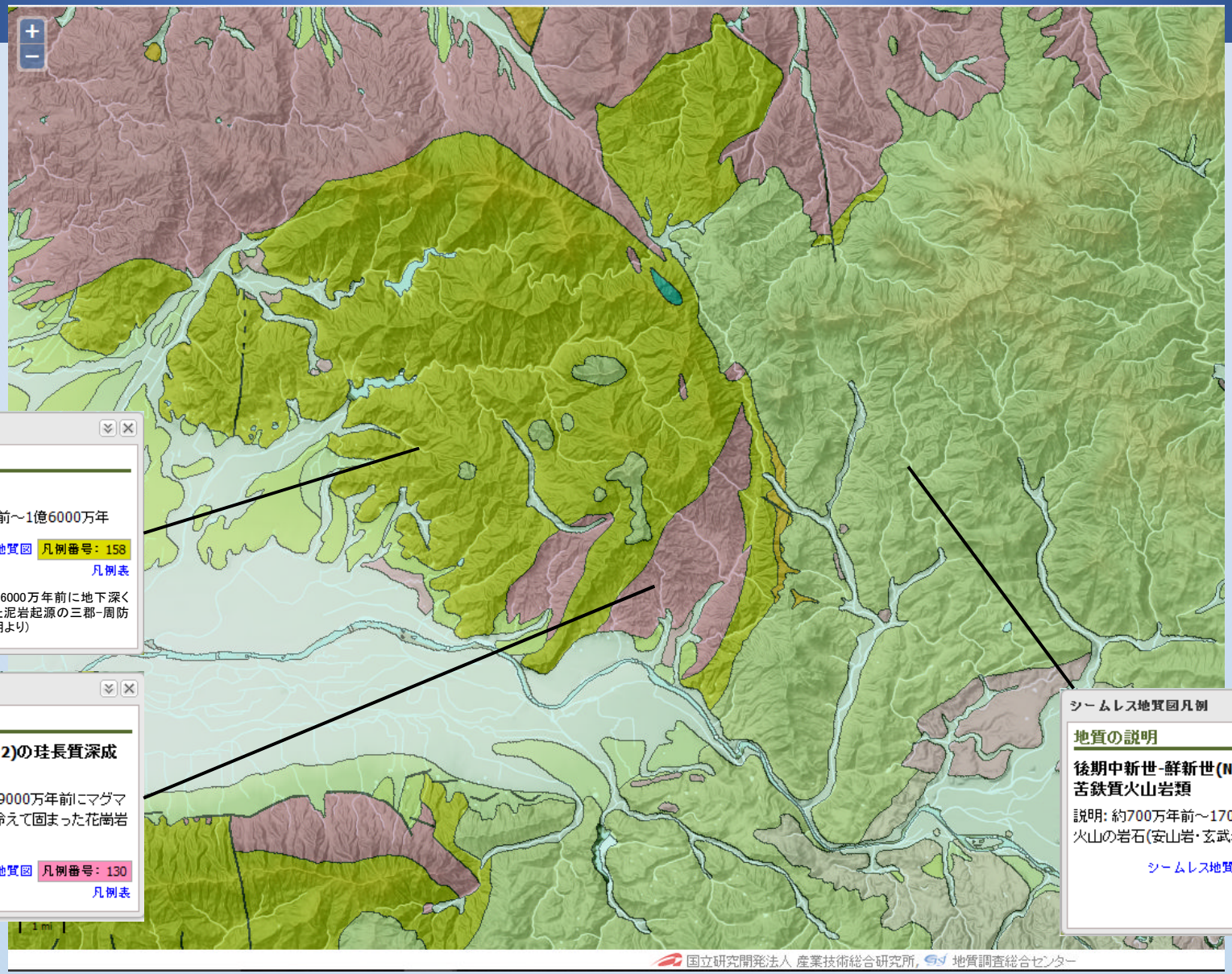
国土地理院による斜面崩壊の判読結果

平成29年7月九州北部豪雨に伴う被害状況判読図



①.この情報は、国土地理院が7月13.30.31日に撮影した空中写真から作成した正射画像及び国土交通省災害対策用ヘリコプターで7月8日に撮影した画像から作成した正射画像に基づき、平成29年7月九州北部豪雨により生じたと考えられる土砂崩壊地・道路損壊・鉄道損壊・洪水流到達範囲を判読したものです。
②.現地踏査は実施していないことから、実際の崩壊、損壊又は到達箇所との相違がある場合があります。また雲やその影で判読できない箇所を範囲(黒色)で表しています。加えて、正射画像作成及び判読とも緊急的に実施したことから位置は正確でない場合もあります。
③.土砂崩壊地は、長さ又は幅があおむね50m以上の急傾斜地の土砂崩壊の範囲(赤色)を表しています。崩壊地と堆積地を1つの項目にまとめて表現しています。また、保全対象との関係などから土砂災害ではないものも含まれる場合もあります。
④.道路の損壊は、区間(ピンク色線)であらわしています。損壊ではなく道路上に土砂等が堆積している場合も含みます。
⑤.鉄道の損壊は、区間(紫色線)であらわしています。損壊ではなく鉄道上に土砂等が堆積している場合も含みます。
⑥.洪水流の到達は、範囲(青色)で表しています。
⑦.表示内容を予告なく修正する場合があります。また、今後の降雨により状況が変化する可能性があります。

産総研によるシームレス地質図



シームレス地質図凡例

地質の説明

三郡-周防

説明: 約2億3000万年前～1億6000万年

シームレス地質図 凡例番号: 158

凡例表

約2億3000万年前～1億6000万年前に地下深くの強い圧力で形成された泥岩起源の三郡-周防変成岩類(詳細: 1661説明より)

シームレス地質図凡例

地質の説明

前-後期白亜紀(K1-2)の珪長質深成岩類

説明: 約1億2000万～9000万年前にマグマが地下の深いところで冷えて固まった花崗岩質の深成岩

シームレス地質図 凡例番号: 130

凡例表

シームレス地質図凡例

地質の説明

後期中新世-鮮新世(N3)の非アルカリ苦鉄質火山岩類

説明: 約700万年前～170万年前に噴火した火山の岩石(安山岩・玄武岩類)

シームレス地質図 凡例番号: 102

凡例表

赤谷川: 花崗岩

シームレス地質図凡例

地質の説明

前-後期白亜紀(K1-2)の珪長質深成岩類

説明: 約1億2000万～9000万年前にマグマが地下の深いところで冷えて固まった花崗岩質の深成岩

シームレス地質図 凡例番号: 130

凡例表

大肥川: 安山岩・玄武岩

(注:写真は花月川上流の小野川流域:安山岩)

九州北部豪雨における様々な被害形態

- 河川の溢水
- 堤防決壊と氾濫
- 斜面崩壊・土石流
- 土砂流出・流木による河道閉塞
- 河岸浸食
- 落橋
- ため池決壊

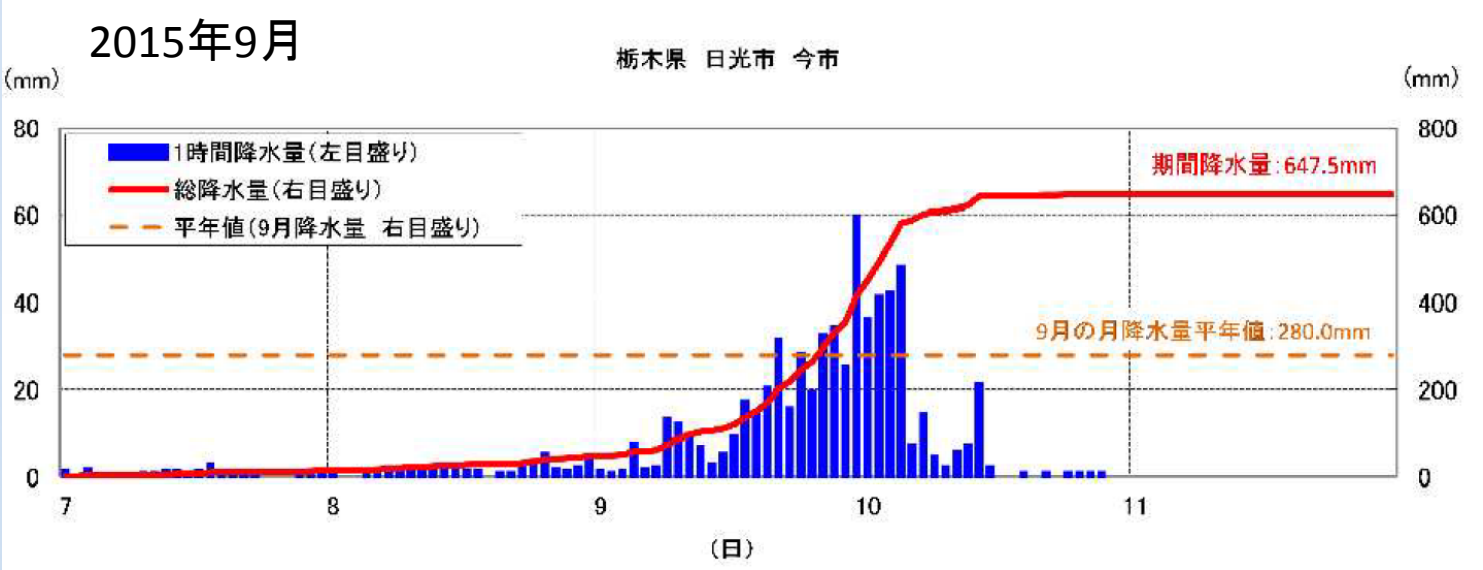
…

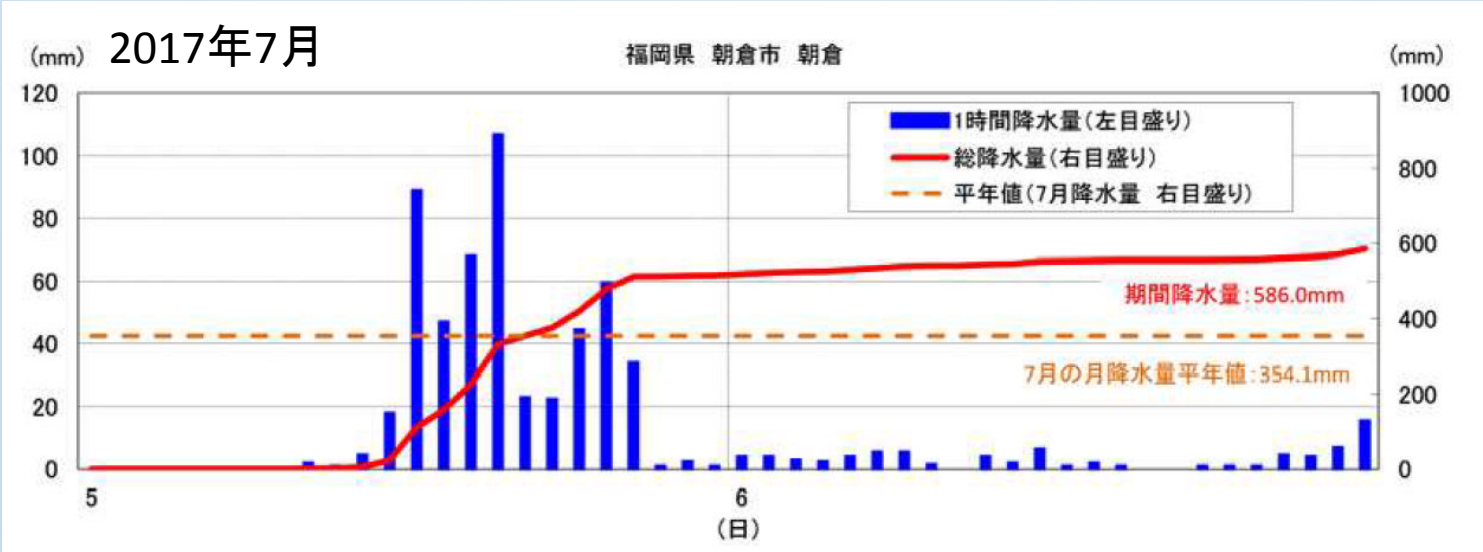
- 山間の谷底を流れる河川やその周辺の氾濫原・河岸段丘が流出土砂によって埋まり、山間部の平野全体に洪水が広がった。

水災害の研究分野

- 気象（気候変動、豪雨予測）
- 水文統計：豪雨の頻度・強度は？
- 流出：流域に降った雨は、どう河川に流れ出るか？
- 河川：河道を流れる水の水位や流速は？
- 氾濫：堤防からあふれた水はどう広がるか？
- ダム・河川構造物：いかに水を制御するか？
- 土砂（斜面崩壊、土石流、河床変動）
- 避難・情報
- 復旧・復興

降雨強度の時間変化


2015年9月
栃木県　日光市　今市
(mm)
(mm)
1時間降水量(左目盛り)
総降水量(右目盛り)
平年値(9月降水量　右目盛り)
期間降水量:647.5mm
9月の月降水量平年値:280.0mm
80
60
40
20
0
800
600
400
200
0
7
8
9
10
11
(日)


2017年7月
福岡県　朝倉市　朝倉
(mm)
(mm)
1時間降水量(左目盛り)
総降水量(右目盛り)
平年値(7月降水量　右目盛り)
期間降水量:586.0mm
7月の月降水量平年値:354.1mm
120
100
80
60
40
20
0
1000
800
600
400
200
0
5
6
(日)

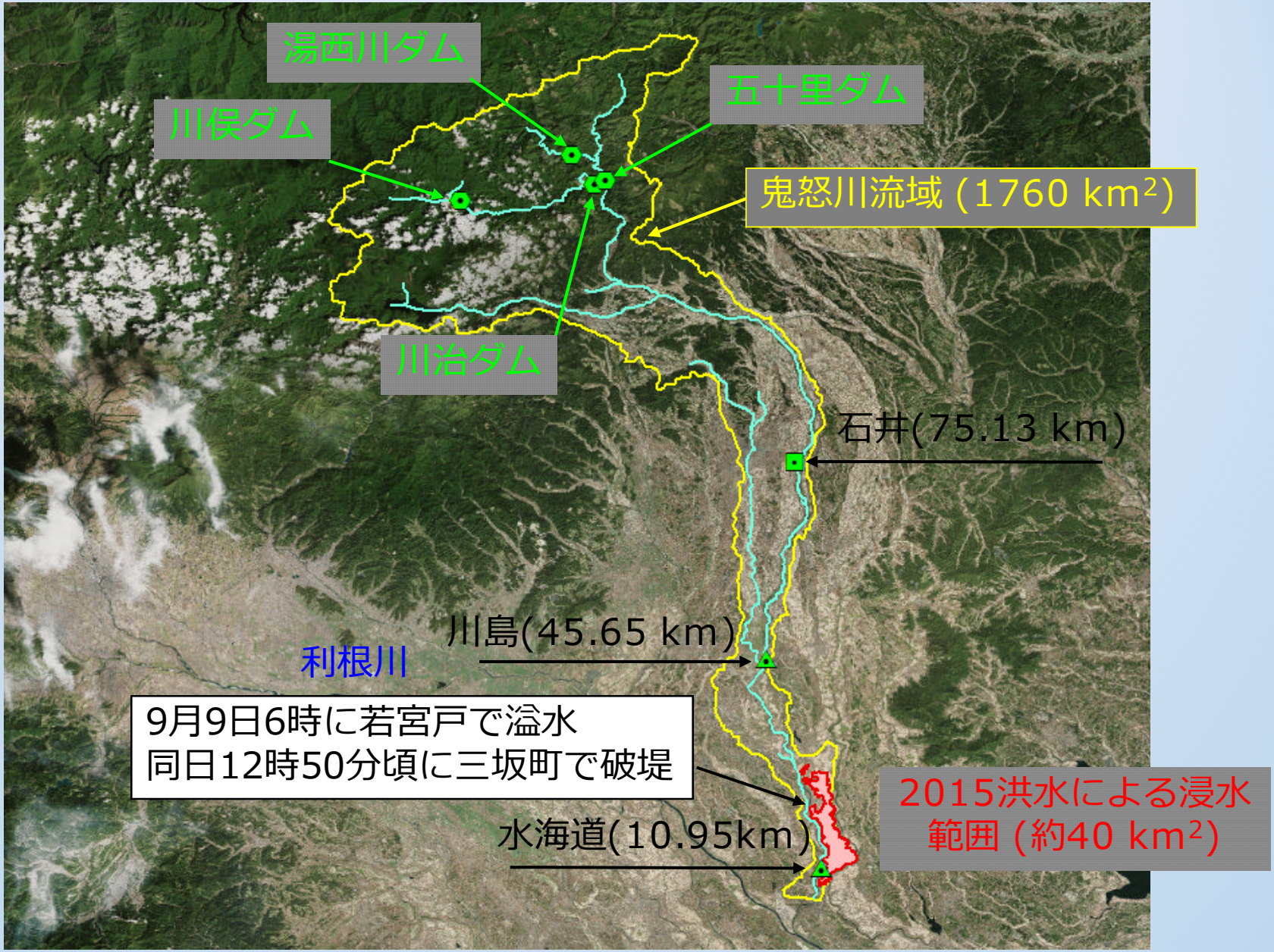
平成27年9月関東・東北豪雨による鬼怒川決壊

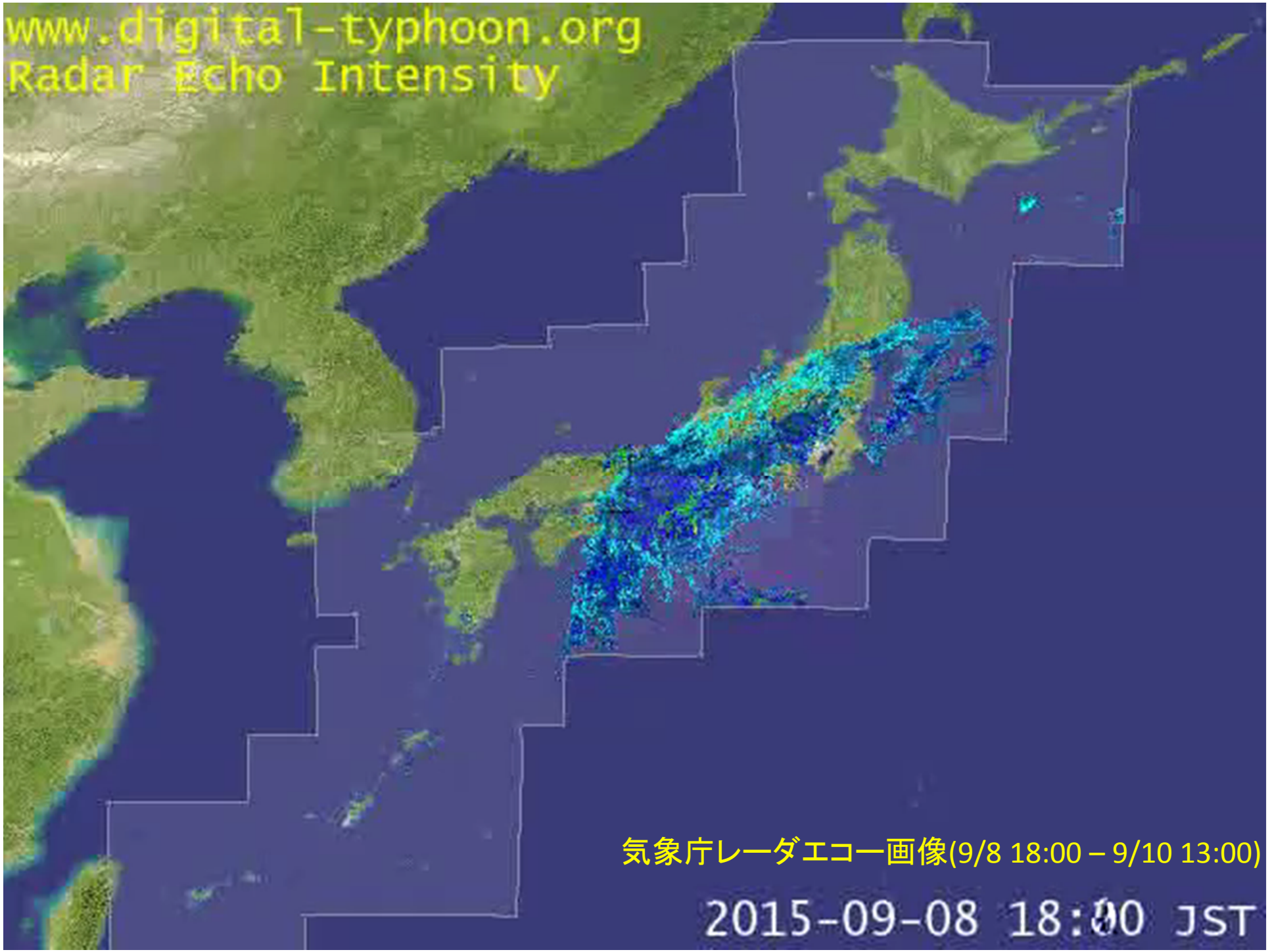
動画

国土地理院平成27年9月関東・東北豪雨の情報　撮影日時：9月10日17：37
http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27.taihuu18gou.html

鬼怒川流域の概要

一級河川の破堤を伴う大規模浸水災害
（関東地方での一級河川の破堤は1986年の小貝川以来初）

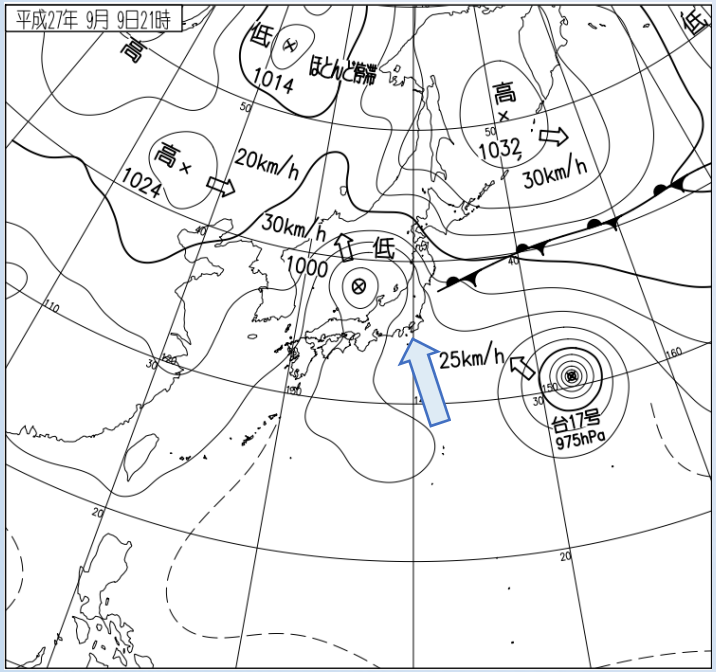




気象庁レーダエコー画像(9/8 18:00 – 9/10 13:00)

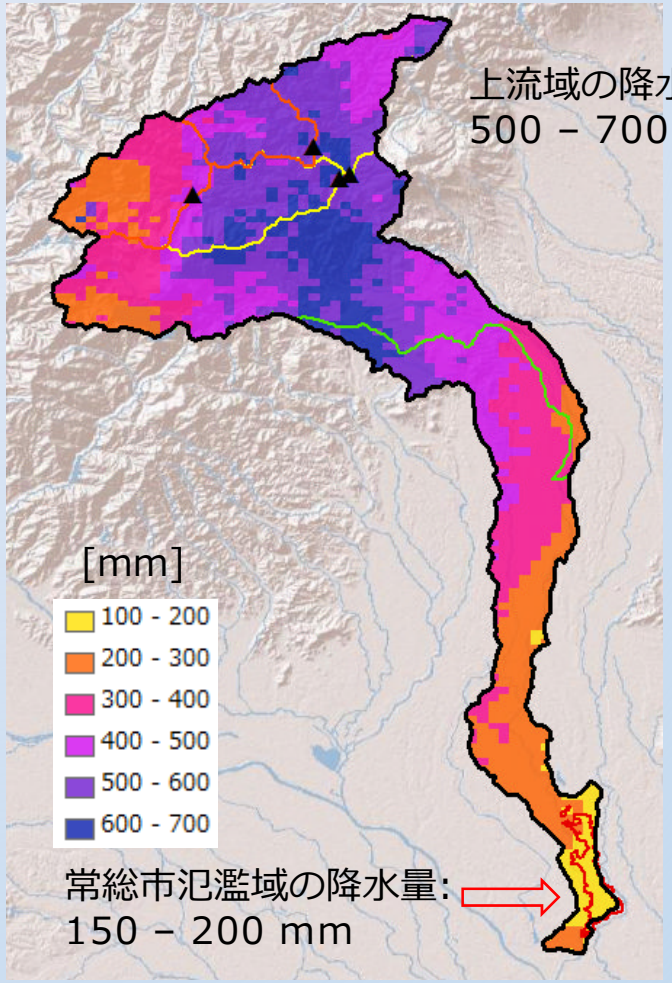
平成27年9月関東・東北豪雨

9月9日21時の天気図



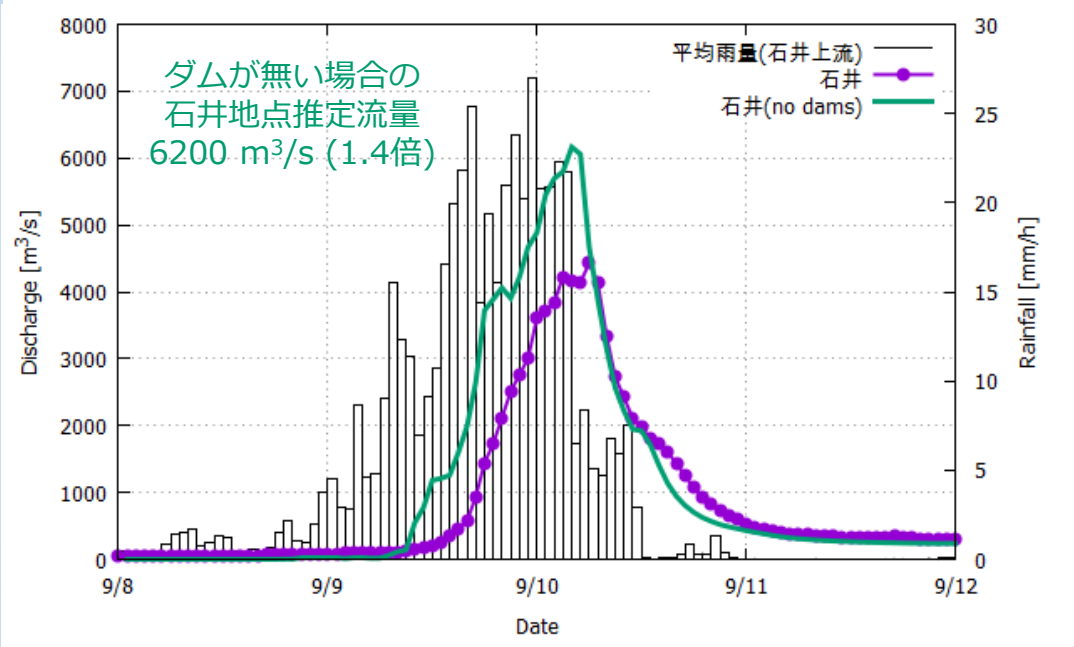
台風18号とその台風から変わった温帯低気圧に吹き込む南東風、台風17号周辺からの南東風により暖かく湿った空気が継続して流入し、多数の線状降水帯が発生。<u>9月9日から10日にかけて、関東北部に48時間600 mmを超える大雨が発生した。</u>

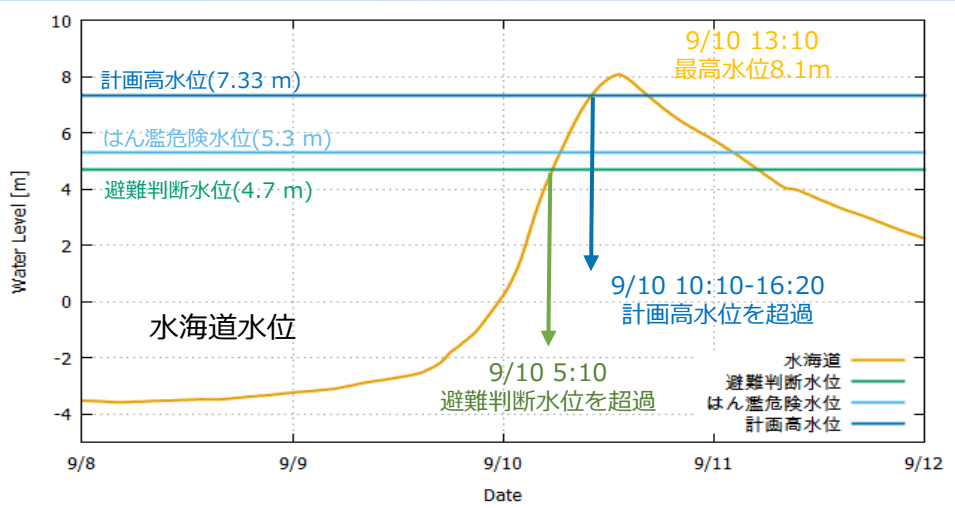
9月8日から11日の積算雨量



気象研究所：平成27年9月関東・東北豪雨の発生要因

降雨流出・河川水位の状況

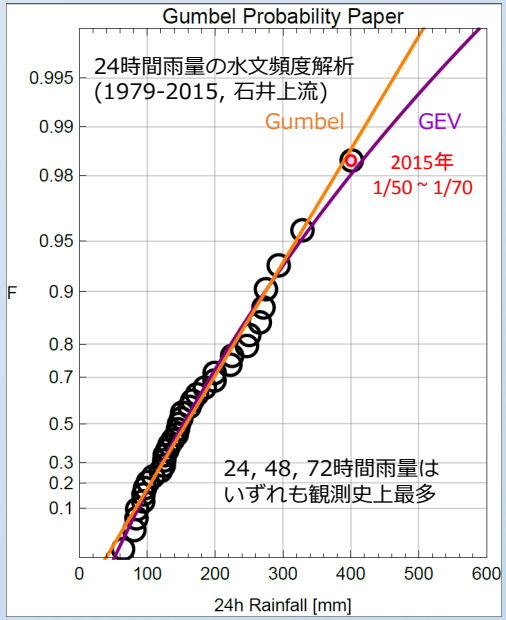




流域平均雨量について

9月9日14時から10日4時までの間で流域平均（石井上流）雨量20 mm前後の強い雨が14時間続いた。

流域平均3日雨量(501 mm)は昭和13年からの観測史上最多で、年超過確率1/110に相当、計画規模(1/100: 402.4 mm)を上回る(国交省関東地整)。

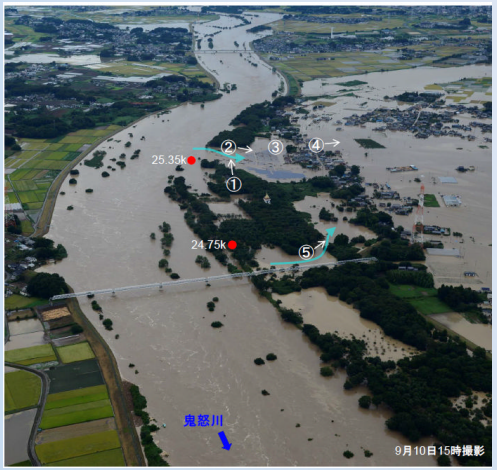


水資源C 田中茂信教授より提供

常総市周辺の浸水被害

9月10日

6時頃:若宮戸地点から越水　　12時50分頃:三坂町で破堤



国土交通省関東地方整備局資料より

常総市における被害の概要

(常総市: 面積: 79.68 km^2, 人口 : 64,000, 世帯数: 23,000)

浸水面積 : 約40 km^2

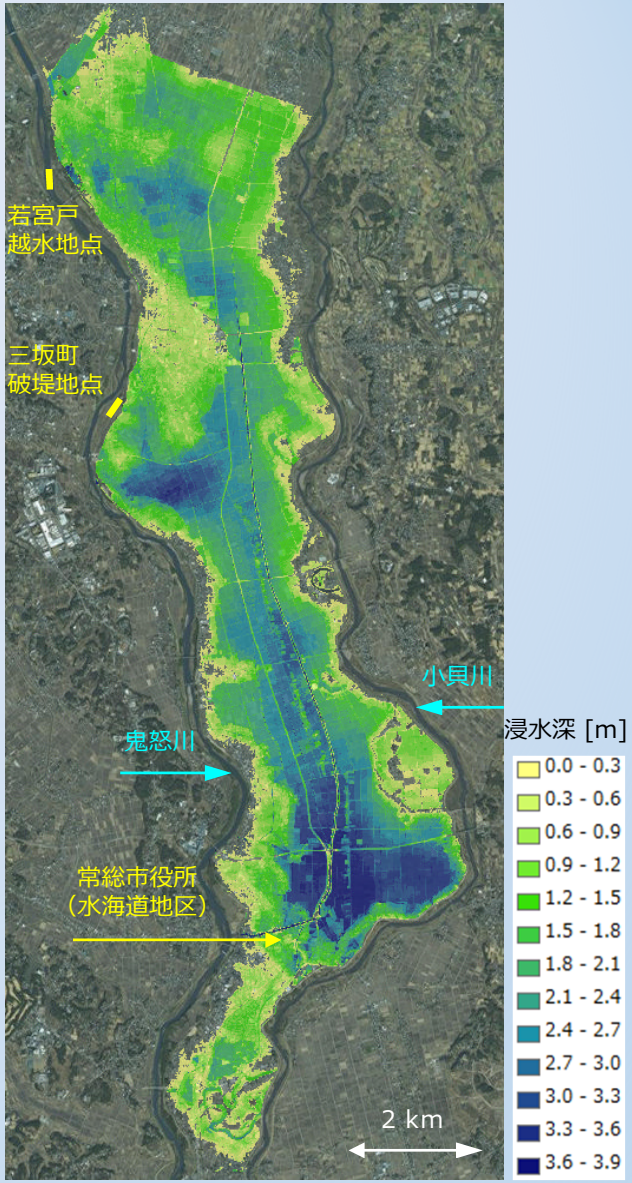
死者: 2名

全壊家屋:53, 大規模半壊: 1578, 半壊: 3476, 床上浸水: 148, 床下浸水: 3072　(計: 8327)

救助者数: 4300人 (うちヘリによる救助者数: 1339名)

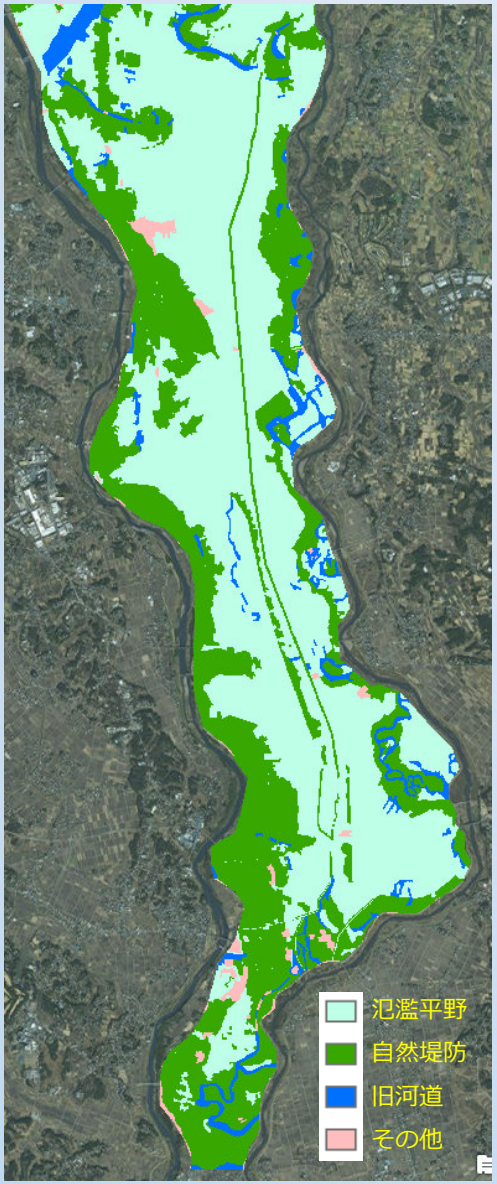
避難指示: 11,230世帯(31,398人), 避難勧告: 990世帯(2,775人)

屋根からヘリコプターで救助される人
毎日新聞社

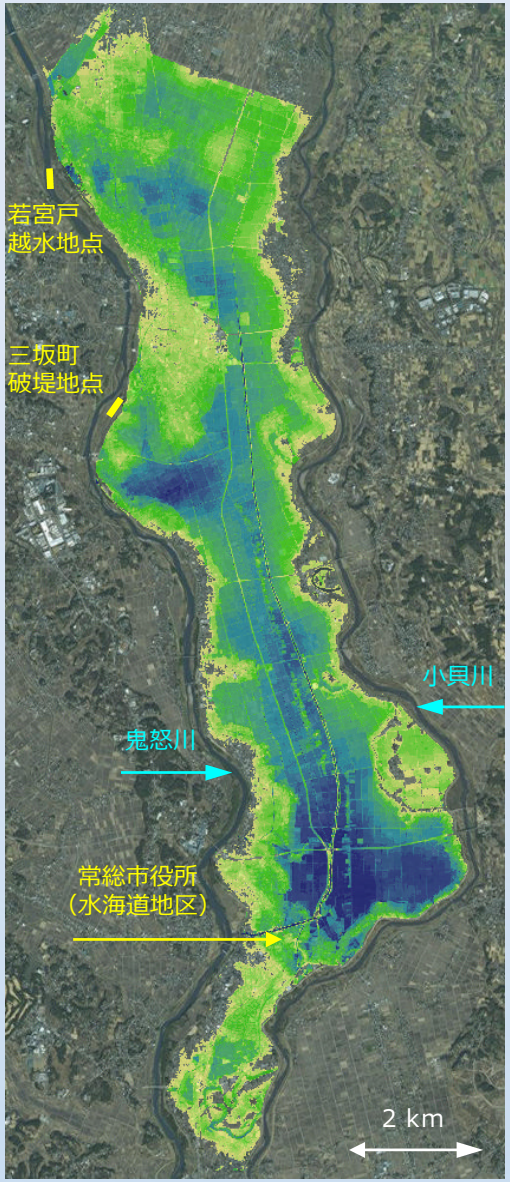


最大浸水深分布の推定結果（佐山ら, 2015）

土地条件と浸水深分布の比較



数値地図25000 (土地条件)



最大浸水深分布の推定結果

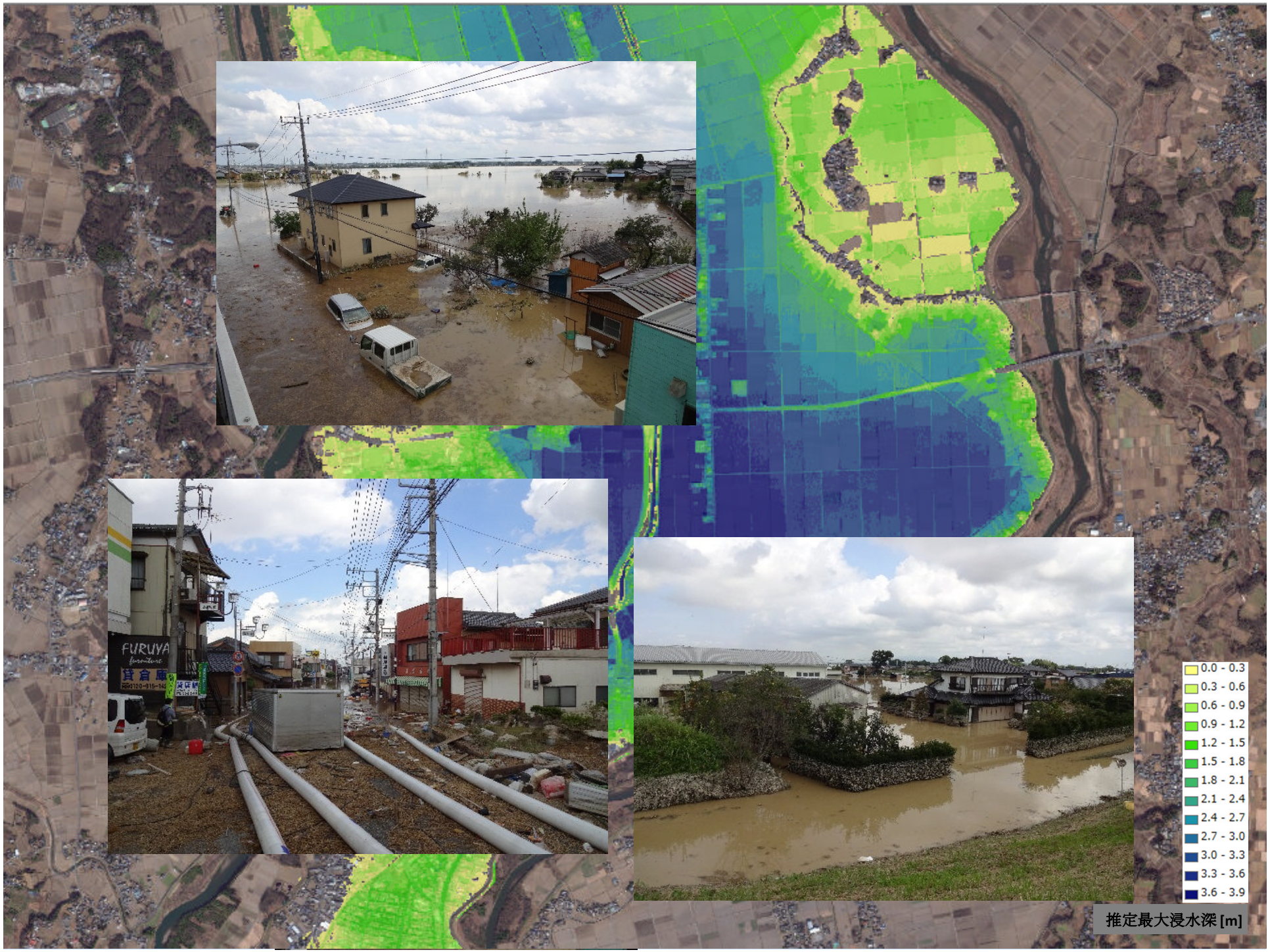
浸水深 [m]

- 0.0 - 0.3
- 0.3 - 0.6
- 0.6 - 0.9
- 0.9 - 1.2
- 1.2 - 1.5
- 1.5 - 1.8
- 1.8 - 2.1
- 2.1 - 2.4
- 2.4 - 2.7
- 2.7 - 3.0
- 3.0 - 3.3
- 3.3 - 3.6
- 3.6 - 3.9

自然堤防では氾濫平野に比べて平均浸水深が50%

土地条件	総面積 [km²]	浸水面積 [km²]	平均浸水深 [m]
氾濫平野	32.6	26.3	2.00
自然堤防	19.7	13.1	1.03
旧河道	3.5	2.0	1.38
その他	1.0	0.6	1.18
合計	56.7	41.9	1.66

0.0 - 0.3
0.3 - 0.6
0.6 - 0.9
0.9 - 1.2
1.2 - 1.5
1.5 - 1.8
1.8 - 2.1
2.1 - 2.4
2.4 - 2.7
2.7 - 3.0
3.0 - 3.3
3.3 - 3.6
3.6 - 3.9
推定最大浸水深 [m]


FURUYA
0.0 - 0.3
0.3 - 0.6
0.6 - 0.9
0.9 - 1.2
1.2 - 1.5
1.5 - 1.8
1.8 - 2.1
2.1 - 2.4
2.4 - 2.7
2.7 - 3.0
3.0 - 3.3
3.3 - 3.6
3.6 - 3.9
推定最大浸水深 [m]

洪水に関する二種類の防災情報

報　道　発　表　資　料
平成２７年９月１０日８時５０分
気　象　庁

茨城県に特別警報発表

・茨城県に大雨特別警報を発表しました。栃木県には引き続き特別警報を発表中です。
・これまでに経験したことのないような大雨となっています。
・“重大な危険が差し迫った異常事態です。”
・土砂崩れや浸水による重大な災害が既に発生していてもおかしくない状況です。
・直ちに、地元市町村の避難情報に従う等、適切な行動をとってください。
・既に外出が危険な場合には、家の二階などのより安全な場所に退避する等、身を守るため、最善を尽くしてください。
・すでに避難を完了している場合も油断しないでください

9月10日7時45分発令

防災気象情報(気象庁)

発表者		第１受報者		第２受報者		第３受報者
国土交通省　下館河川事務所 気象庁　宇都宮地方気象台 気象庁　水戸地方気象台	→	機関名	→	機関名	→	機関名

正規

鬼怒川はん濫危険情報

鬼怒川洪水予報第３号
洪水警報
平成27年09月10日00時15分
下館河川事務所 宇都宮地方気象台 水戸地方気象台　共同発表

（見出し）
鬼怒川では、はん濫危険水位（レベル４）に到達　はん濫のおそれあり

（主　文）
鬼怒川の石井（右）水位観測所（宇都宮市）では、当分の間はん濫注意水位（レベル２）を超える水位がしばらく続く見込みです。引き続き、洪水予報に注意して下さい。

鬼怒川の川島水位観測所（筑西市）では、9日23時30分頃に、はん濫危険水位（レベル４）に到達しました。川沿いの筑西市、結城市、下妻市、結城郡八千代町、常総市のうち、堤防の無い、または堤防の低い箇所などでははん濫するおそれがありますので、各自安全確保を図るとともに、市町村からの避難情報に注意して下さい。

（雨量）
多いところで１時間に60ミリの雨が降っています。
この雨は当分この状態が続くでしょう。

流域	07日23時40分～09日23時40分までの流域平均雨量	09日23時40分～10日02時40分までの流域平均雨量の見込み
鬼怒川流域	272ミリ	30ミリ

（水位）
鬼怒川の水位観測所における水位は次の通りと見込まれます。

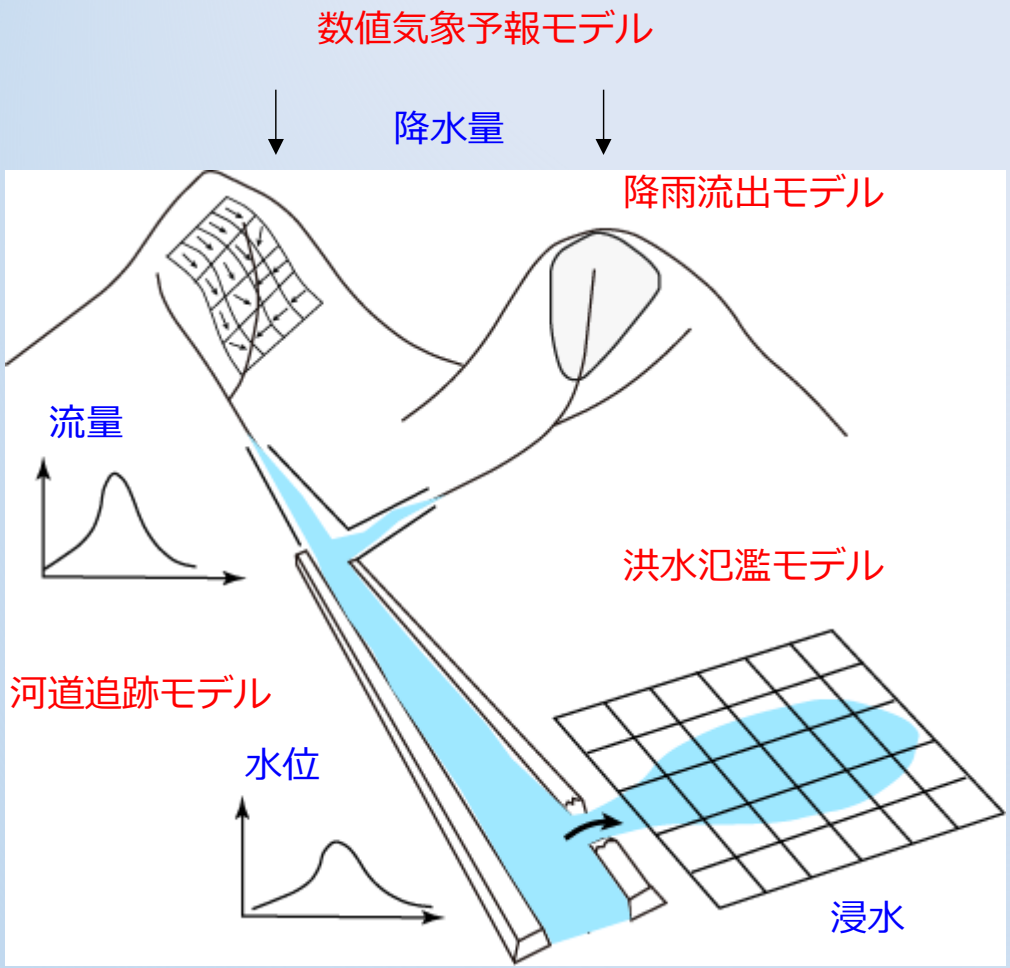
指定河川洪水予報

指定河川洪水予報

水防法

- 氾濫注意情報：氾濫注意水位に到達しさらに水位の上昇が見込まれた時
- 氾濫警戒情報：避難判断水位に到達したときさらに水位の上昇が見込まれた時、あるいは水位予測に基づき氾濫危険水位に達すると見込まれた時
- 氾濫危険情報：氾濫危険水位に到達した時
- 氾濫発生情報：氾濫が発生した時

洪水予測に関する4要素とモデリング

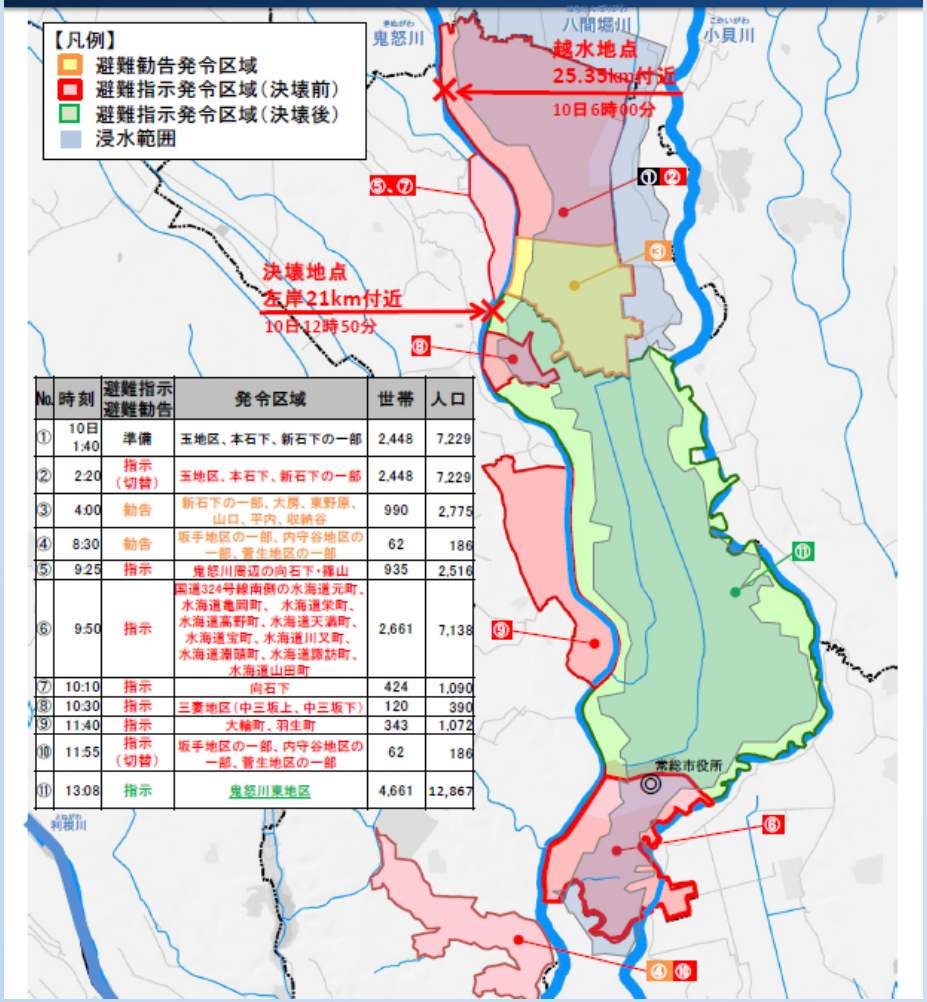


- 数値気象予測モデル(Numerical Weather Prediction Model): 降水量の定量的予測
- 降雨流出モデル(Rainfall-Runoff Model): 降雨から河川流量の予測
- 河川流モデル(River Routing Model): 上流の河川流量を境界条件にした洪水の伝播・河川水位の予測
- 洪水氾濫モデル(Flood Inundation Model): 決壊地点からの越流量を境界条件とした浸水域・浸水深の予測

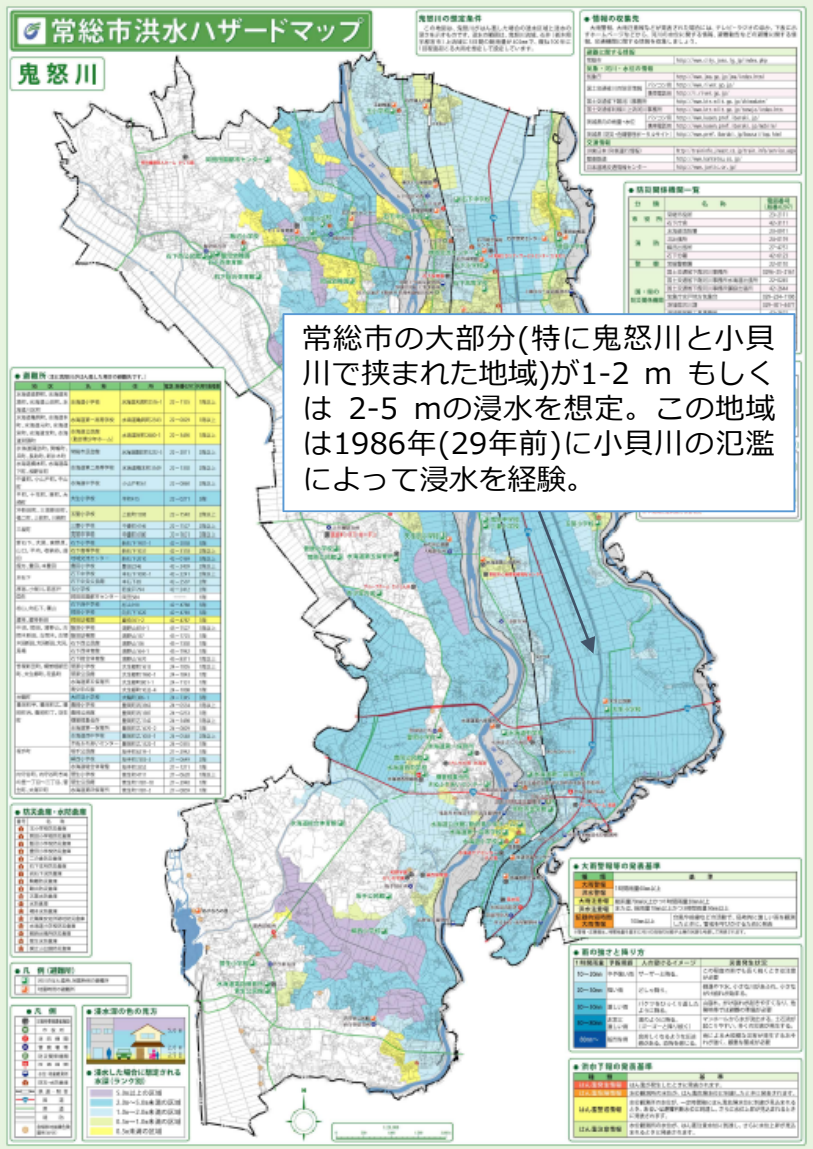
避難勧告・指示について

指定河川洪水予報に基づく常総市の避難指示・勧告

常総市　避難勧告・指示の発令状況



No.	時刻	避難指示 避難勧告	発令区域	世帯	人口
①	10日 1:40	準備	玉地区、本石下、新石下の一部	2,448	7,229
②	2:20	指示 （切替）	玉地区、本石下、新石下の一部	2,448	7,229
③	4:00	勧告	新石下の一部、大房、東野原、山口、平内、収納谷	990	2,775
④	8:30	勧告	坂手地区の一部、内守谷地区の一部、菅生地区の一部	62	186
⑤	9:25	指示	鬼怒川周辺の向石下・鎌山	935	2,516
⑥	9:50	指示	国道324号線南側の水海道元町、水海道亀岡町、水海道栄町、水海道高野町、水海道天満町、水海道宝町、水海道川又町、水海道瀬頭町、水海道諏訪町、水海道山田町	2,661	7,138
⑦	10:10	指示	向石下	424	1,090
⑧	10:30	指示	三妻地区（中三坂上、中三坂下）	120	390
⑨	11:40	指示	大輪町、羽生町	343	1,072
⑩	11:55	指示 （切替）	坂手地区の一部、内守谷地区の一部、菅生地区の一部	62	186
⑪	13:08	指示	鬼怒川東地区	4,661	12,867



常総市の大部分(特に鬼怒川と小貝川で挟まれた地域)が1-2 m もしくは 2-5 mの浸水を想定。この地域は1986年(29年前)に小貝川の氾濫によって浸水を経験。

内閣府水害時の避難・応急対策検討ワーキンググループ資料より
http://www.bousai.go.jp/fusuigai/suigaiworking/index.html

ここまでのまとめ

- 指定河川洪水予報では、河川の主要地点において、観測された水位が危険なレベルにまで達しているか、また今後数時間のうちにどう変化するかを予測する。

- 洪水予報や気象予報に基づき、市町村町は避難勧告や指示を出す。

- 浸水の危険なエリアはハザードマップ確認することができる。

ここまでのまとめ：関東・東北豪雨では

- 指定河川洪水予報では、河川の主要地点において、観測された水位が危険なレベルにまで達しているか、また今後数時間のうちにどう変化するかを予測する。

  ⇒ 「はん濫危険情報」などは早い段階から発表されていた。

- 洪水予報や気象予報に基づき、市町村町は避難勧告や指示を出す。

  ⇒ 常総市は避難勧告や指示が出されていた。

- 浸水の危険性はハザードマップで事前に確認する。

  ⇒ 常総市の今回被災した地域は、ほとんどが浸水想定区域。

  ⇒ いつ・どのようなタイミングでどこまで氾濫水が到達するかを、行政・住民がイメージすることはできたか？

  ⇒ 被害が拡大するなかで、どこで・どのように浸水しているかを把握する手立てはないか？

ここまでのまとめ：九州北部豪雨では

- 指定河川洪水予報では、河川の主要地点において、観測された水位が危険なレベルにまで達しているか、また今後数時間のうちにどう変化するかを予測する。

  ⇒ 水位計も無いような支川で被害が発生した。

- 洪水予報や気象予報に基づき、市町村町は避難勧告や指示を出す。

  ⇒ 記録的短時間大雨情報が発令されていた。

- 浸水の危険性はハザードマップで事前に確認する。

  ⇒ 洪水ハザードマップは主要河川の破堤氾濫を対象としている。

  ⇒ 多くの地区で水・土砂災害が発生し、集落も孤立して、被災状況を把握することすら困難。

洪水予測の技術について：問題意識

現行の洪水予測：河川水位の予測
（指定河川洪水予報）

観測水位のある地点で今後
どのように水位が変化
するかを予測する。
降雨流出モデルを利用する。

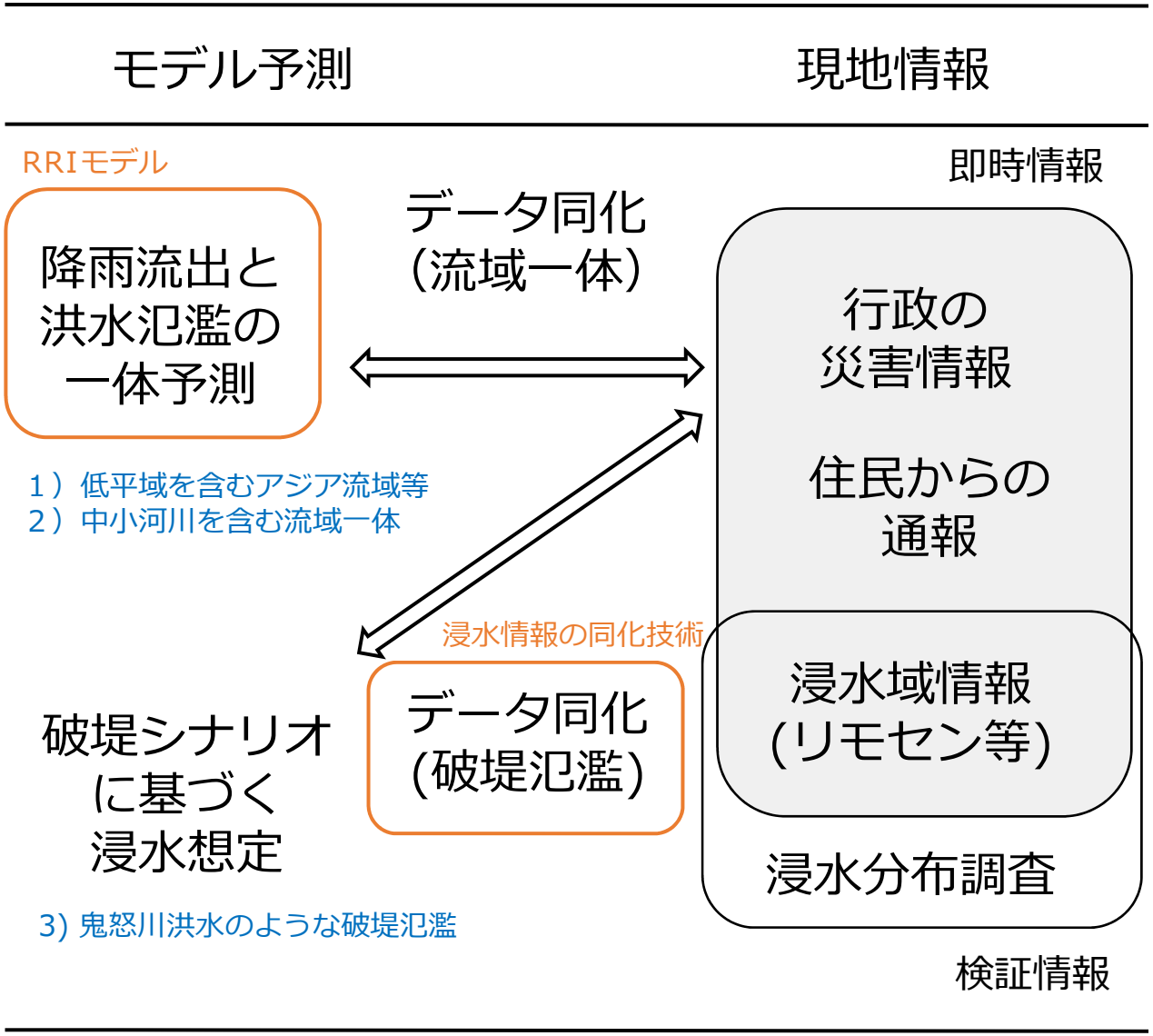
問題点
浸水の状況を把握・予測できない。
とくに中山間地を含む自治体では、
豪雨時に孤立集落が多発し浸水被害
の状況を把握することも困難。
自治体職員の巡回や消防団による
情報を活用できていない。

目指す方向

「いま・どこで・どの程度？」
◎ 自治体向けの高解像度
リアルタイム浸水ハザードマップ

実現のための二つのアプローチ
A) レーダ雨量や気象予測情報を
活用して降雨流出と洪水氾濫を
一体的に予測する。
B) 現地の情報と事前に実施するシ
ミュレーション情報を統合する。

リアルタイム浸水予測の関連研究



降雨流出氾濫(RRI)モデル

従来の降雨流出モデル：

降雨から河川流量を予測
（空間分布型のモデルでも氾濫の影響は解けない）

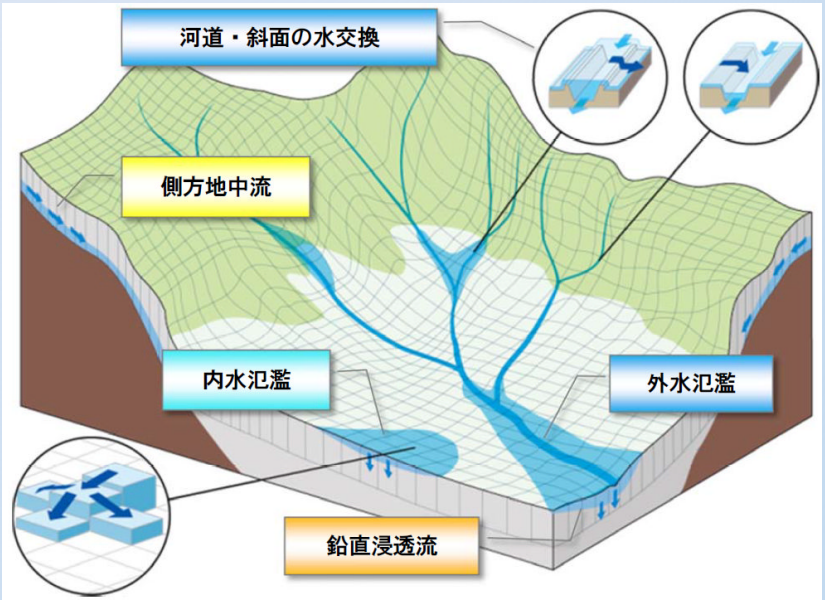
従来の洪水氾濫モデル：

破堤地点での流入量境界条件をもとに氾濫原の浸水を詳細に解析
→ 浸水想定域の計算に利用

Rainfall-Runoff-Inundation Model (RRIモデル)

降雨流出から洪水氾濫までを流域全体で一体的に解析

土壌への浸透や地中流など、降雨流出モデルの特性も備える



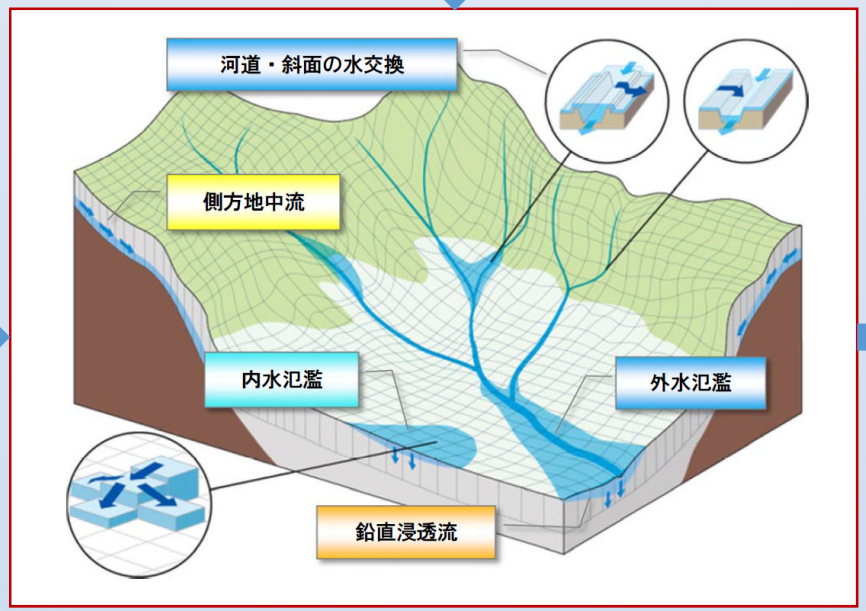
土木研究所ICHARMのHPで公開
http://www.icharm.pwri.go.jp/research/rri/rri_top.html

RRIモデルの概要

降雨(Rainfall) – 流出 (Runoff) – 氾濫 (Inundation) → RRIモデル

入力情報

- 降雨分布
- 標　高
- 土地利用
- 河道断面

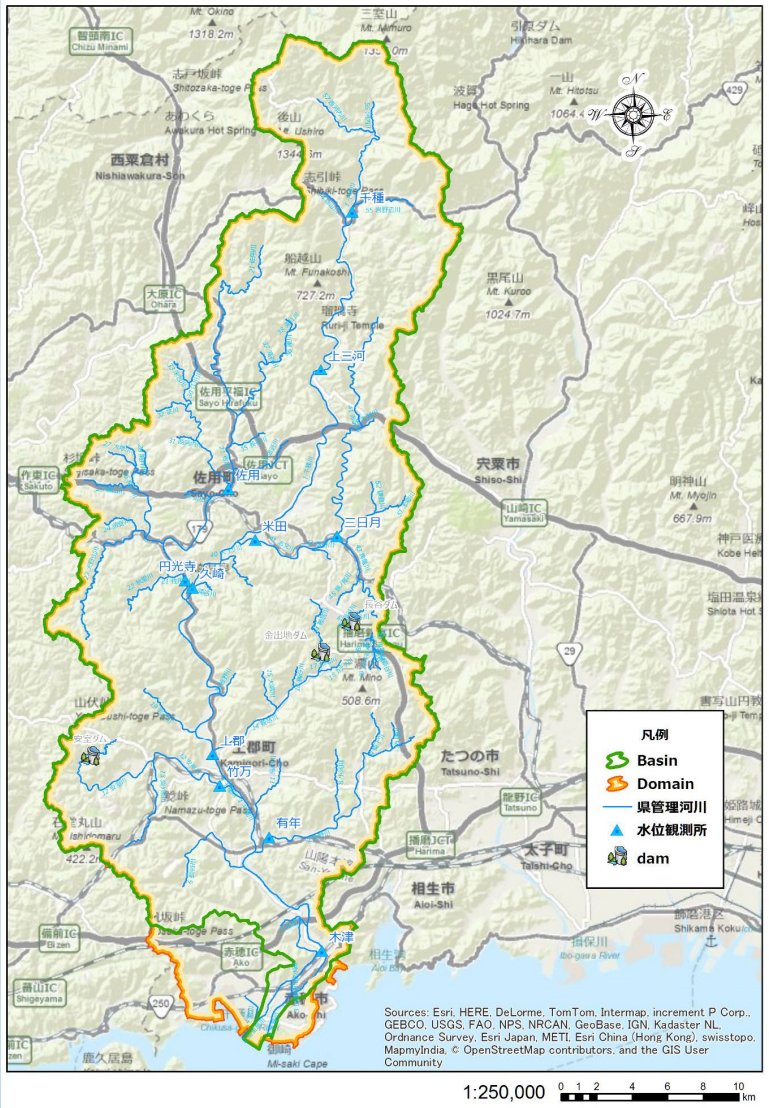


出力情報

- 河川流量
- 河川水位
- 浸 水 深

Sayama *et al.*, HSJ, 2012
http://www.icharm.pwri.go.jp/research/rri/rri_top.html

対象流域：兵庫県千種川流域



千種川流域の777.6 km^{2}を対象

佐用町市街地　（佐用町役場）

久崎地区被害状況

2009年8月台風第9号洪水による
千種川上流佐用川洪水

中小河川も含むリアルタイムの浸水予測

- 産官学の協同プロジェクトでモデル適用と検証を進めてきた。
- 約100 m分解能で兵庫県千種川(対象範囲777.6 km^2)を解析
- グリッドセルの数：75,081
- 任意の河道断面を反映した詳細なモデリング
- DIAS上でRRIモデルを実装

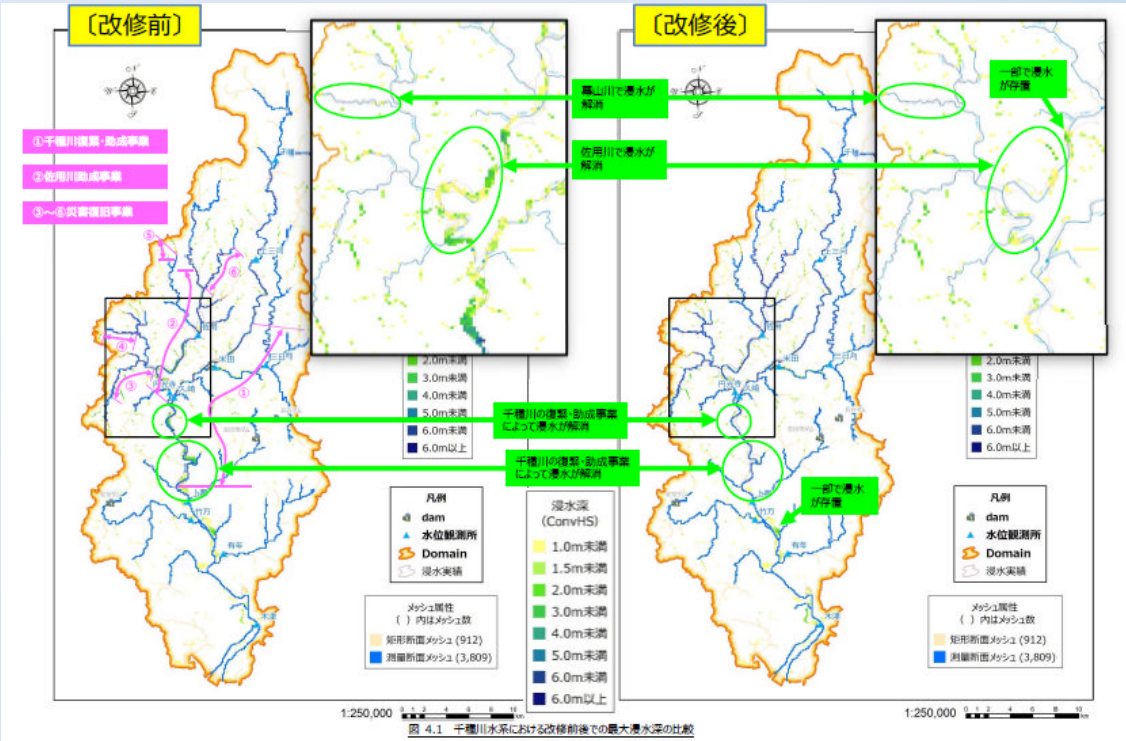


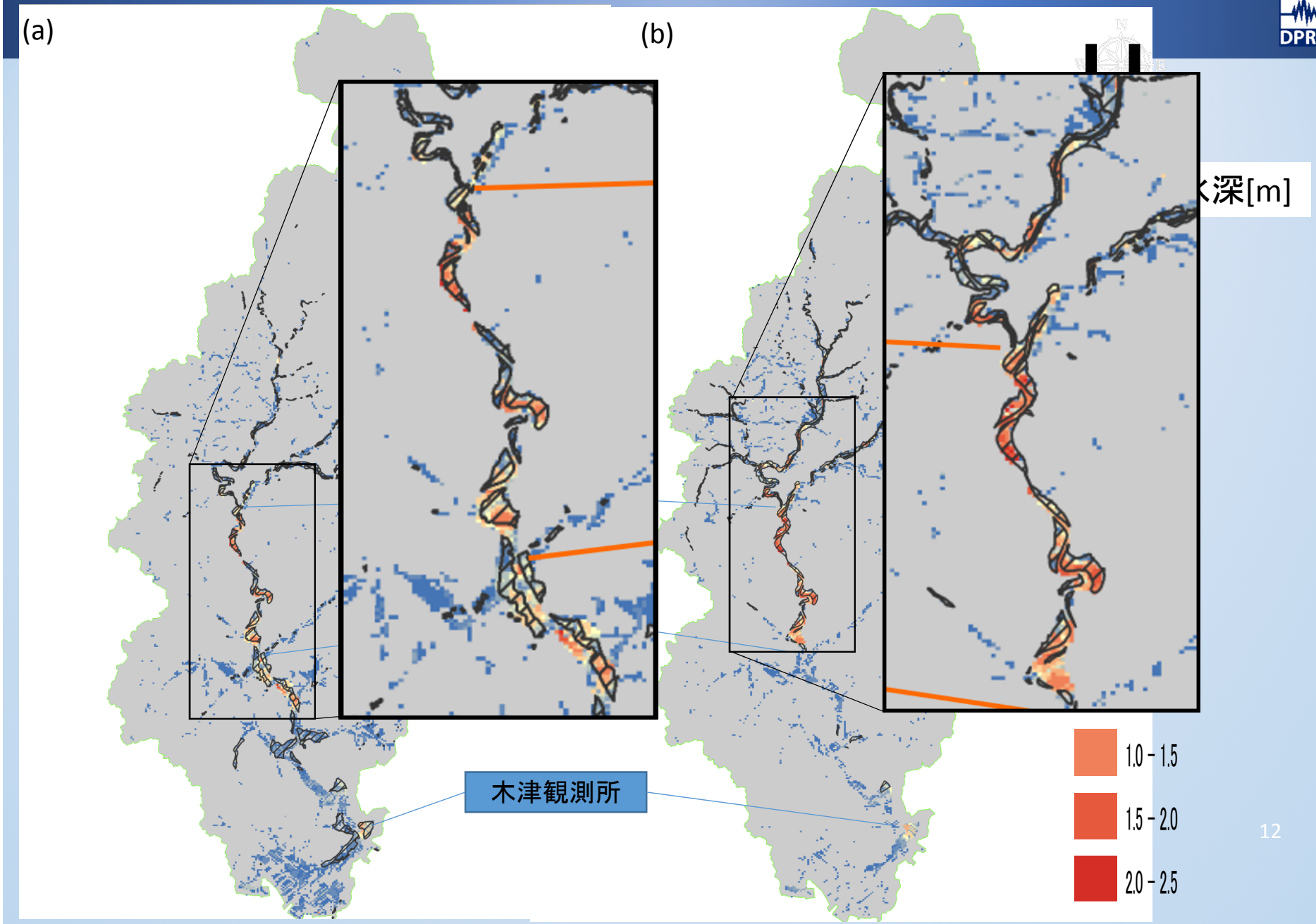
図 4.1 千種川水系における改修前後での最大浸水深の比較

これまで主に国外の流域を対象に適用を進めてきたRRIモデルが、詳細な地形情報や河道断面情報を反映することで、中小河川の越流・溢水も含めた解析が実行できることが分かってきた。

⇒ 国内中小河川でリアルタイム浸水ハザードマッピングを実現できる可能性がある

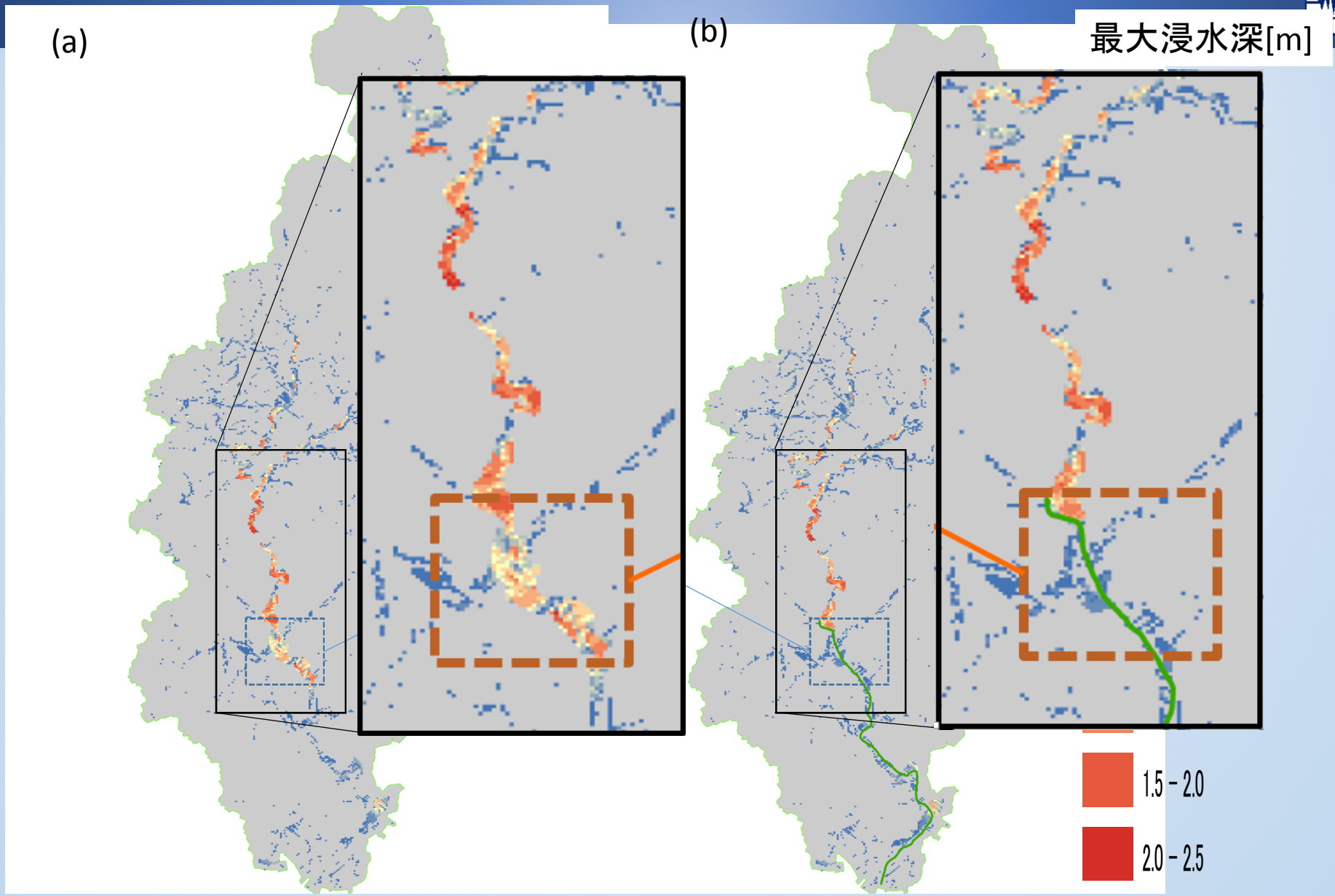
XRAIN情報を入力した1分更新のリアルタイム運用が可能

氾濫実績と推定氾濫域



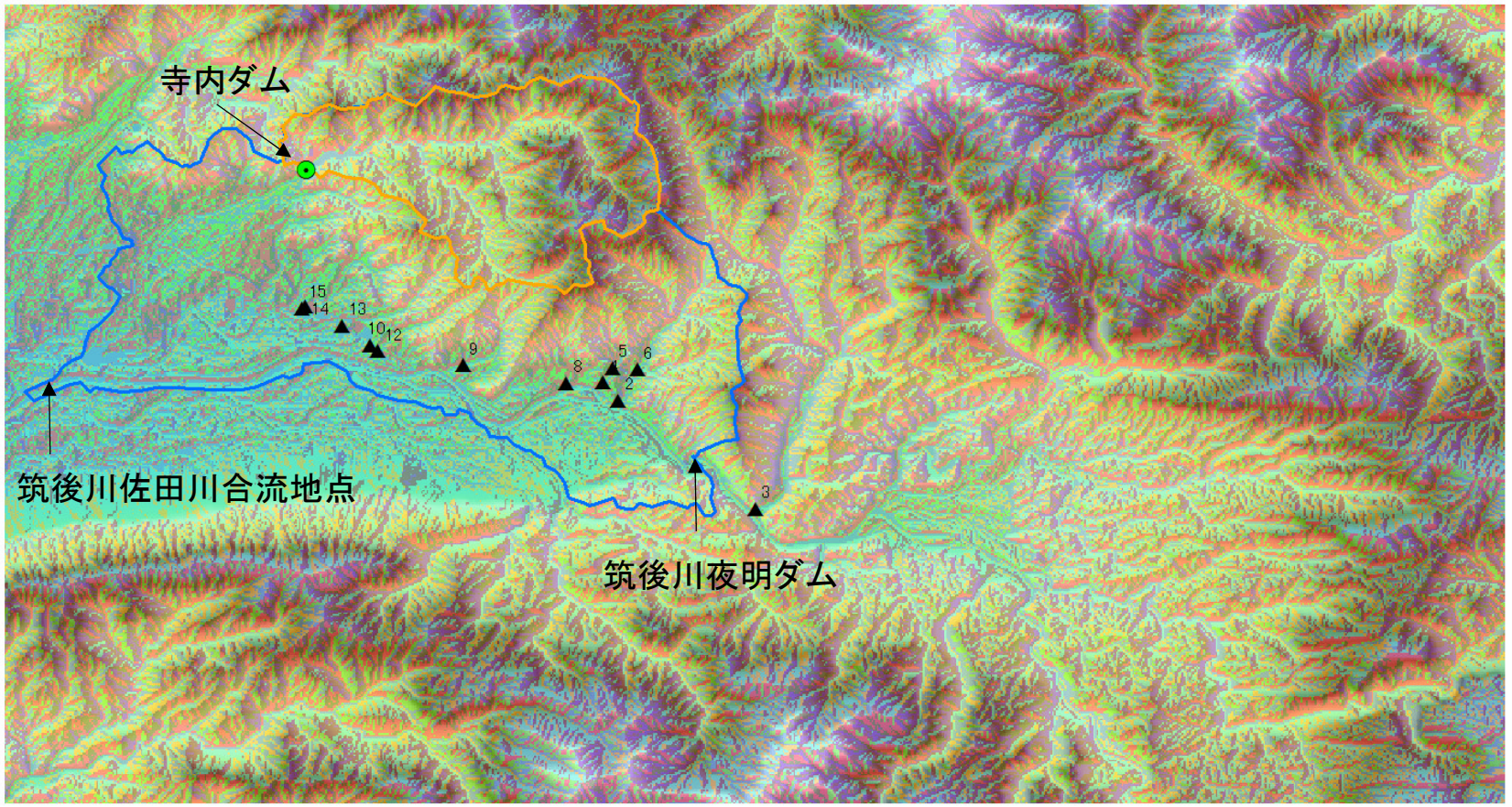
(a) RRIによる推定氾濫域（2004年再現）　(b) RRIによる推定氾濫域（2009年再

河道改修効果　平成21年8月台風第9号洪水



(a) 床上改修前(2004年当時)　　(b) 床上改修後(2009年当時)

平成29年7月九州北部豪雨：解析対象域



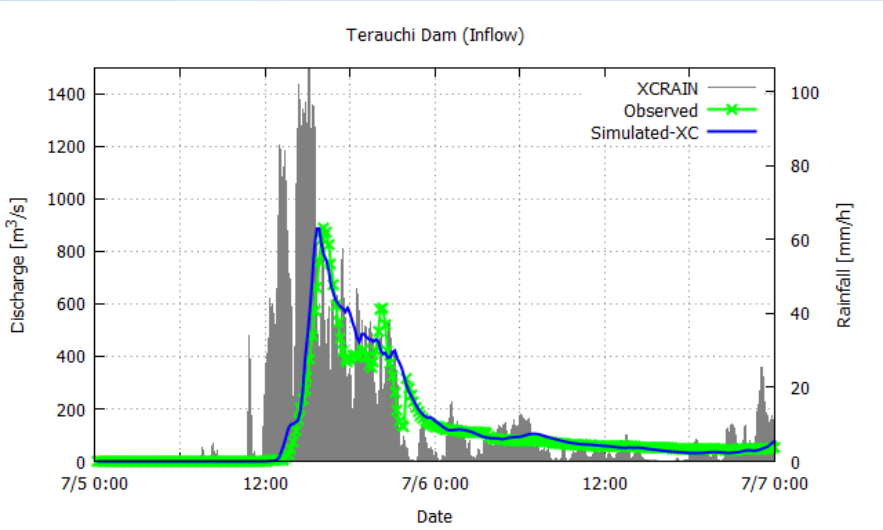
10 km

▲ 7/15 GPS計測ポイント
川幅・深さ (推定)・浸水位を計測

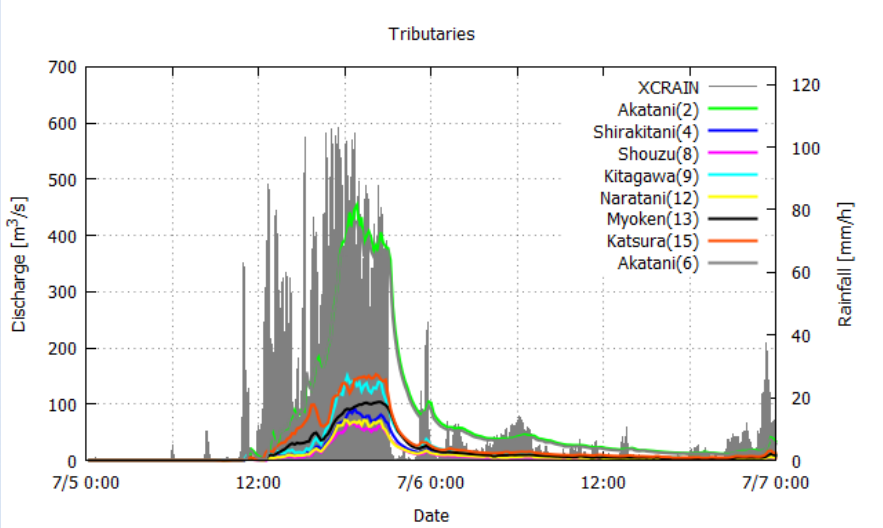
計算対象領域:上流: 筑後川夜明ダム、下流:筑後川佐田川合流地点
下図青線:190.4 km^2 (含む:寺内ダム流域: 51 km^2)
入力降雨: CX合成雨量, 使用モデル: RRI (空間分解能: 約50 m)

平成29年7月九州北部豪雨：解析対象結果

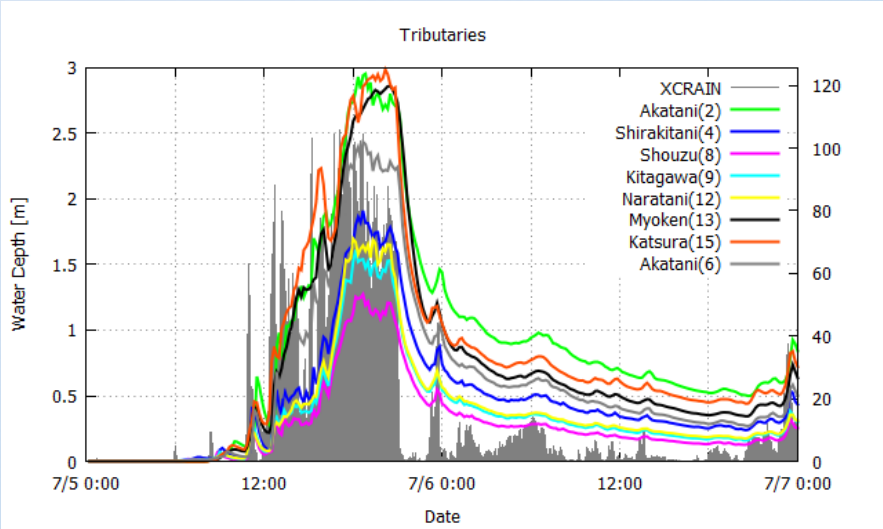
寺内ダムの流入量計算結果



各支川の流入量計算結果

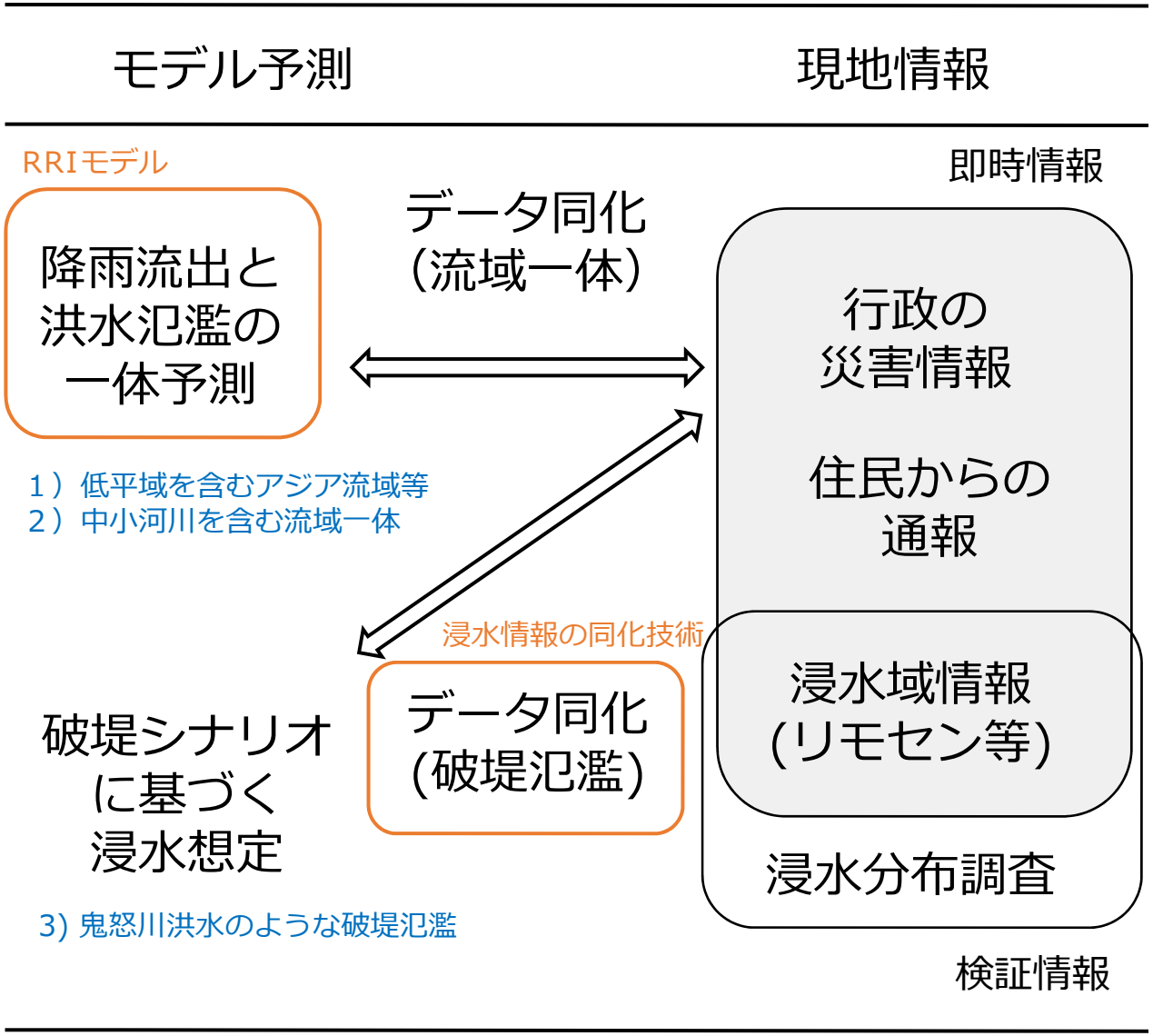


各支川の水位変化推定

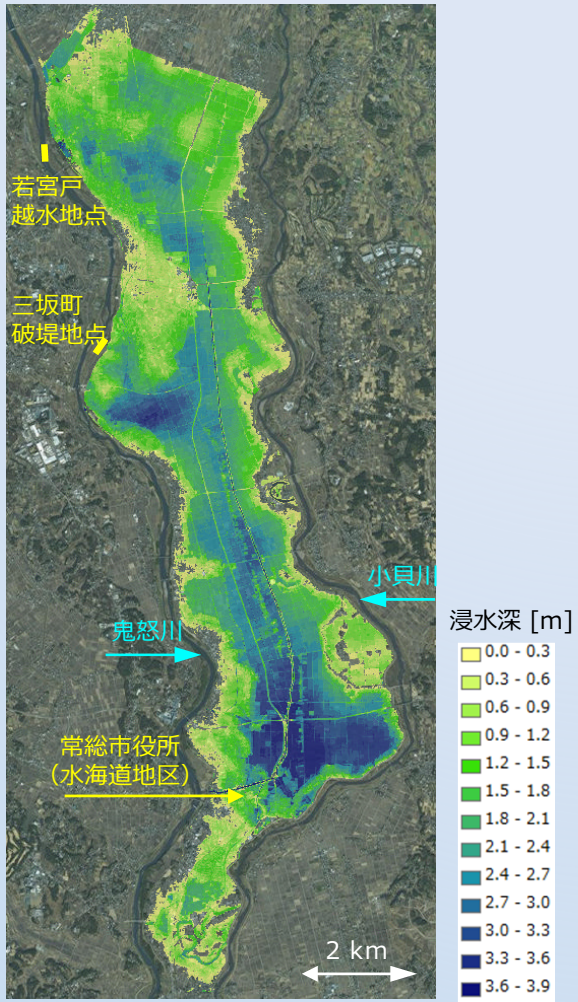


CXレーダ合成雨量を入力した結果

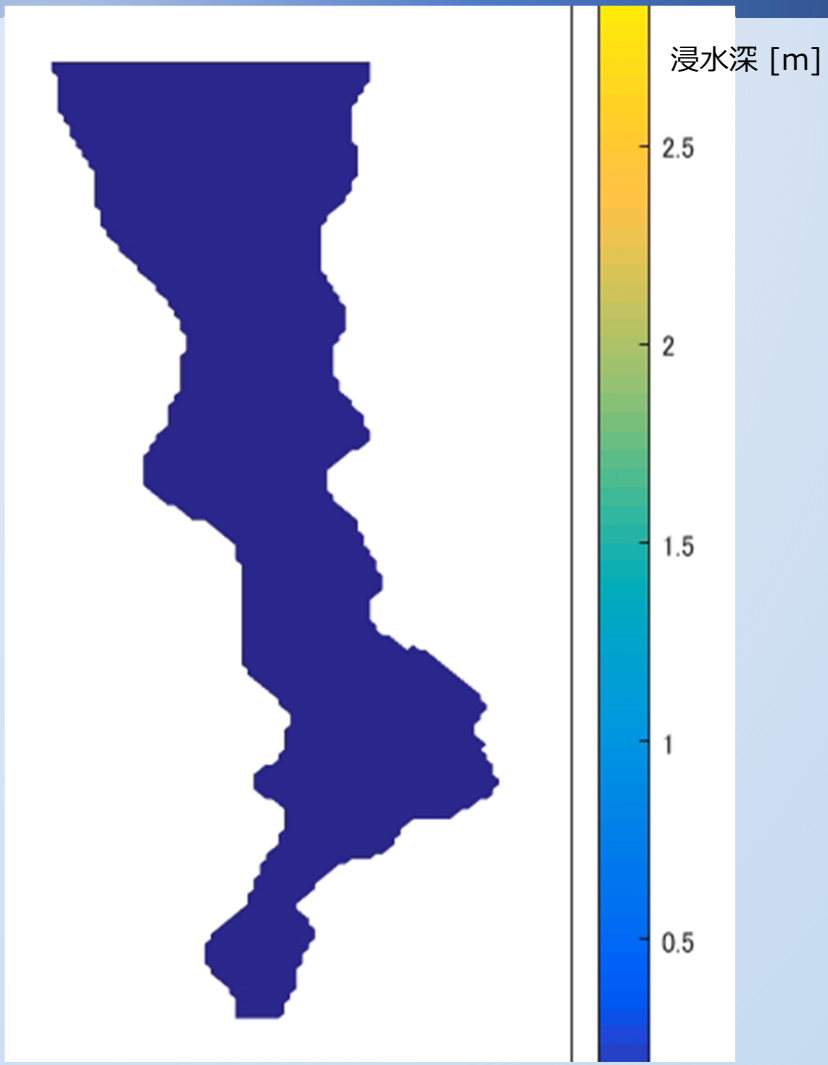
リアルタイム浸水予測の関連研究



想定している状況

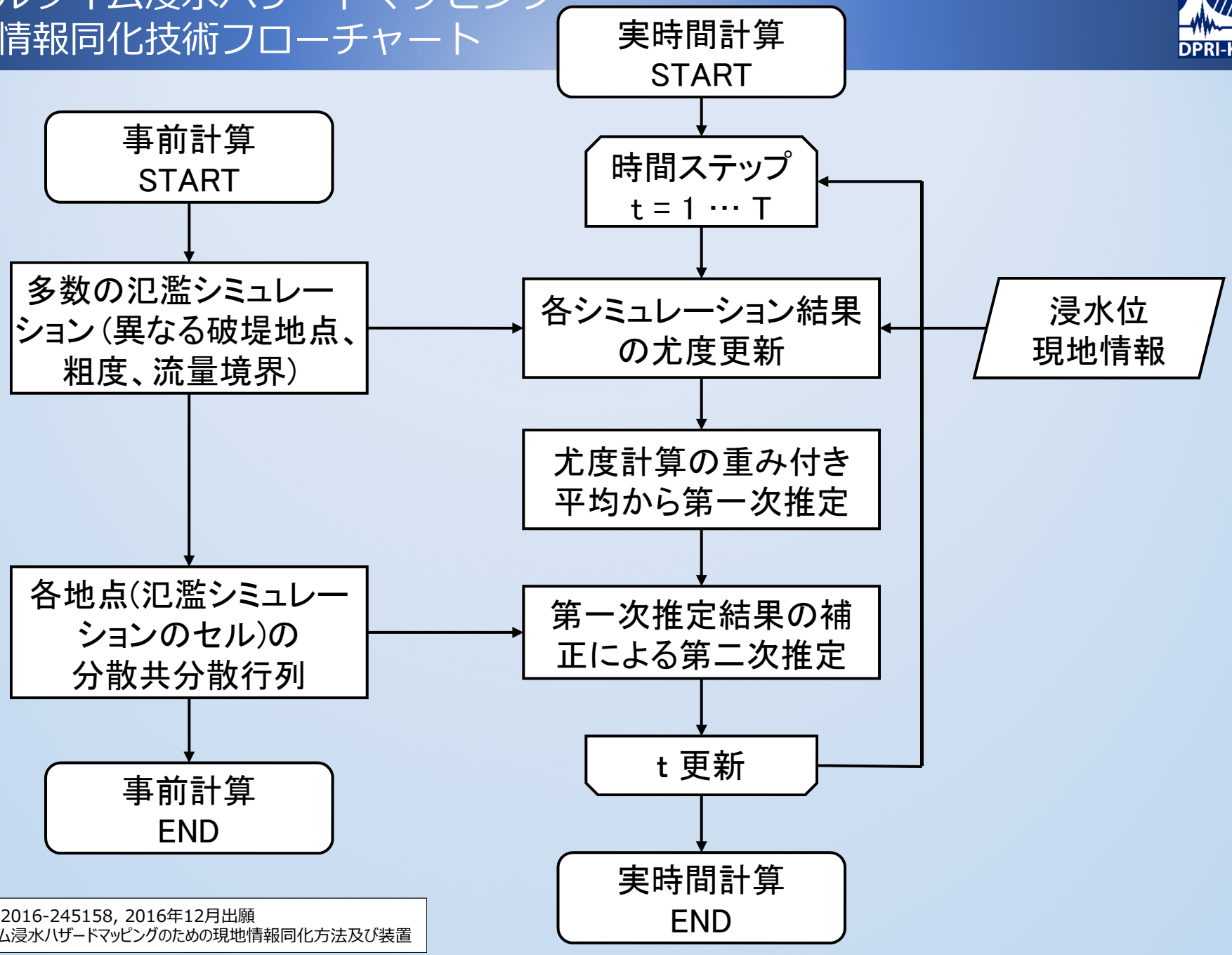


H27年鬼怒川洪水による常総市周辺の氾濫状況
最大浸水深分布の推定



・白丸で示された地点でおおよその浸水深の情報が分かる(膝上、車水没など)。
・おおよその破堤地点が分かる。ただし、氾濫量は分からない。

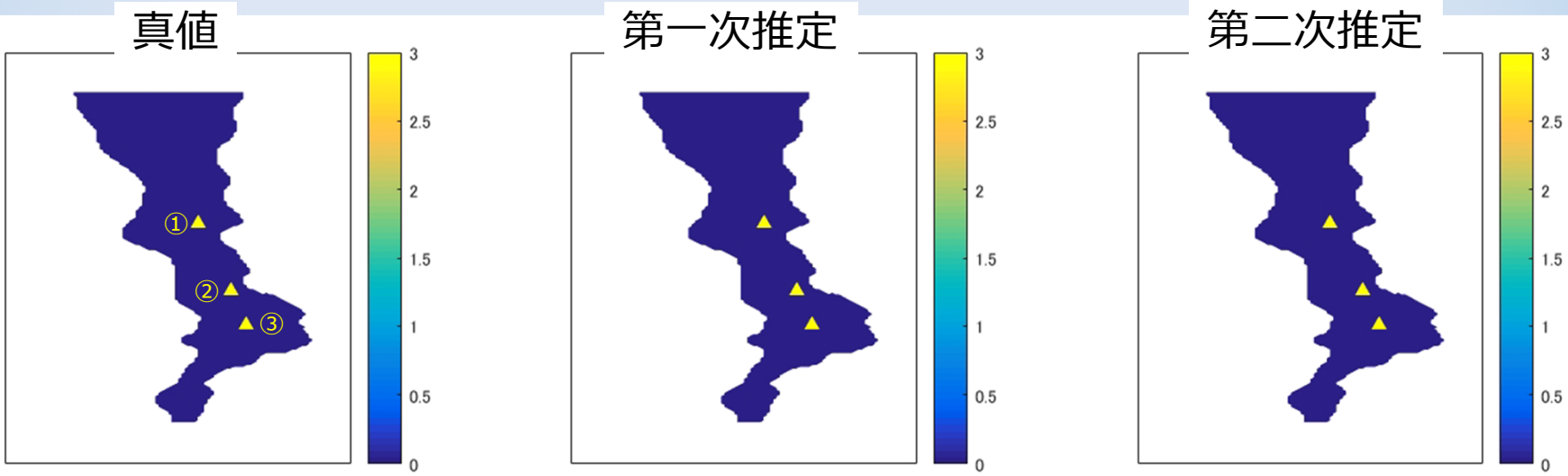
リアルタイム浸水ハザードマッピング
現地情報同化技術フローチャート



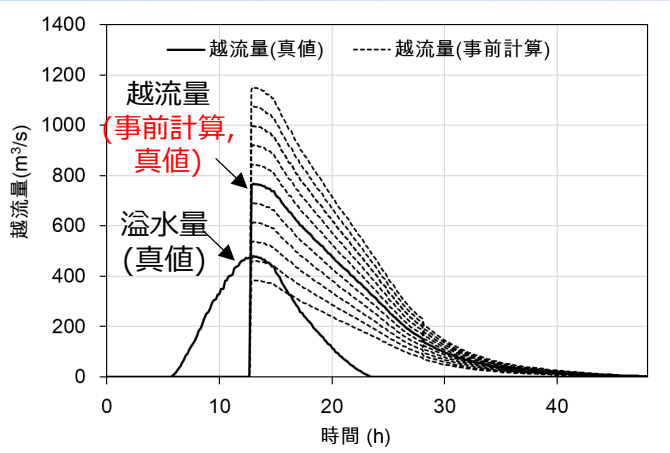
特許願: 2016-245158, 2016年12月出願
リアルタイム浸水ハザードマッピングのための現地情報同化方法及び装置

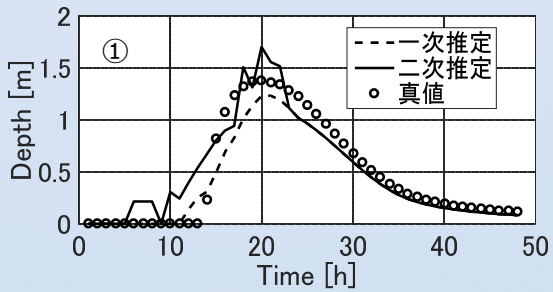
C3: 鬼怒川洪水の浸水計算

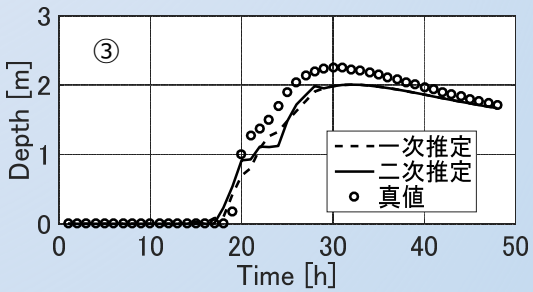
②複数地点で誤差を含む水位が観測

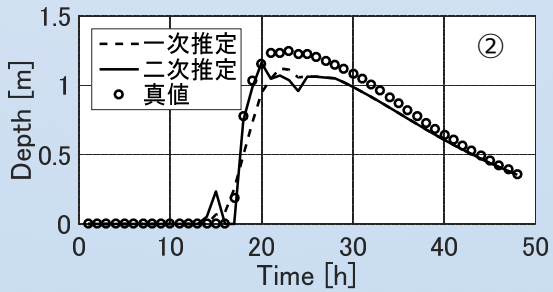


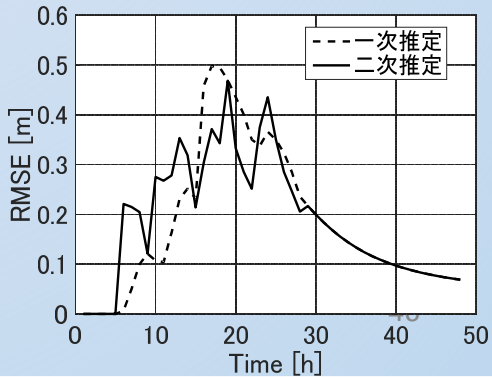
Time = 1 h　観測浸水深は一定値(70 cm)を仮定











粗度：0.05, 0.1 (真値), 0.2, 0.3, 0.4
境界条件引き伸ばし率(%)：
50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150
事前計算の破堤地点：計5箇所
(事前計算・実時間ともに破堤・溢水の両方を反映させる)

まとめ

- 全く現象の異なる二つの水災害: 平成27年9月関東・東北豪雨災害と平成29年7月九州北部豪雨災害の比較。

- 関東・東北豪雨による災害は、河川行政が想定している形態の被害であり、その規模が想定や現状の整備レベルを上回った。
- 九州北部豪雨による災害は、山地河川流域における継続的な集中豪雨によって発生した水・土砂の複合的災害。同規模の豪雨が発生すれば、日本各地で生じ得る。

- 従来の洪水予測は、河川水位が観測された場所で、今後数時間のうちにどう水位が変化するかを予測する。
- リアルタイムで浸水の状況を把握・予測する技術を開発している。
- 中小河川も含めて、降雨流出から洪水氾濫までを流域一体で予測する。
- 現場からの情報をいかに活用するか。
- 予測技術をいかに減災に結びつけるか。