



広域に適用可能な一次元田んぼダムモデルの開発と 潜在的洪水緩和機能の評価

東北大学 工学研究科 土木工学専攻

峠 嘉哉

■ 本日の発表内容

【概論】 田んぼダムの概要

- 流域治水
- 既往の田んぼダムモデルの紹介と東北大モデルのコンセプト

【手法】 東北大モデルの概要

- 一次元田んぼダムモデルの構成と意図
- 洪水氾濫解析モデル
- シナリオ解析の設計と狙い

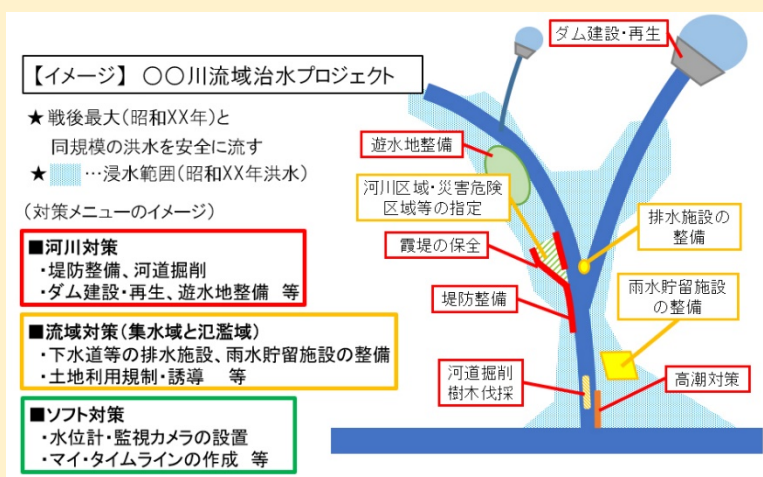
【結果】 鳴瀬川での適用例

- 台風19号豪雨を対象とした田んぼダムの潜在的効果の推定

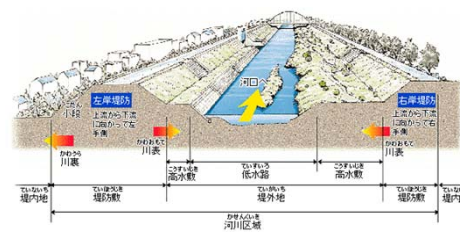
■ 流域治水

流域治水： “流域”が社会全体で洪水に備える仕組み

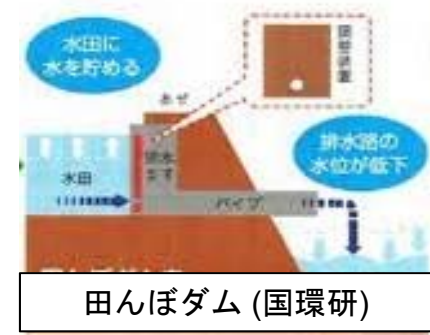
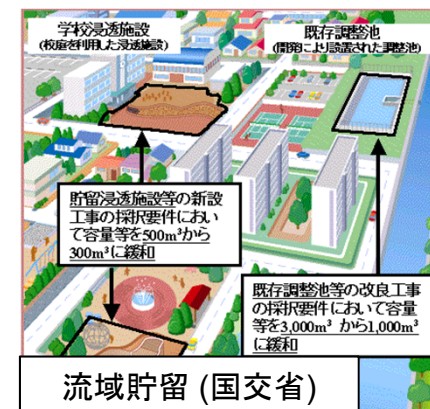
社会情勢・進行する気候変動の影響・技術革新を踏まえた対策の組み合わせ
強靭性・**包摂性**（あらゆる主体が協力）・**持続可能性**を目指す



流域治水のイメージ (国交省HP)



堤防整備 (国交省)

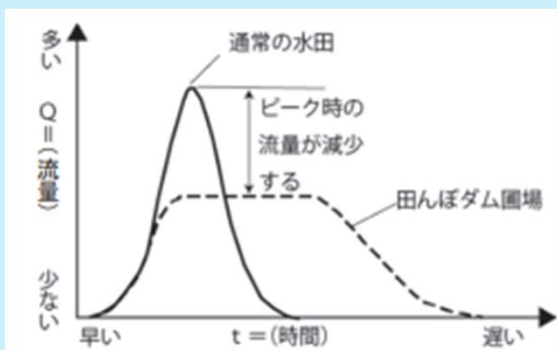


- ・ **流域治水は“対策の組み合わせ”**
- ・ **地域ごとに適した形を検討する必要**
- ・ **各主体の効果算定が困難な課題**

■ 田んぼダムと実施例

田んぼダム

田んぼが本来的に持つ貯水機能を用いて豪雨を一時的に貯水しピークを遅らせる



田んぼダムによる河川流量の低減効果 (大竹 2020)



調整柵 (新潟県)

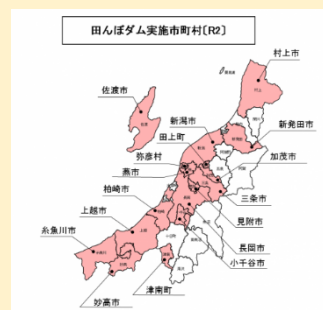


オリフィス (宮津ら 2017)

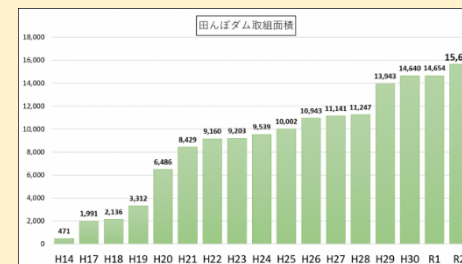
広大な田んぼで貯水できるが農家の協力が必須

新潟県での実施例

先進的に実施されており、普及拡大のための取り組みも行われている。



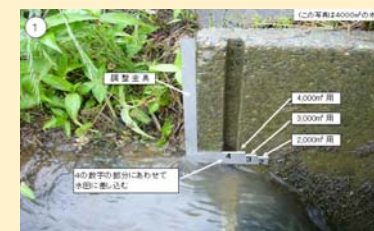
田んぼダム実施市町村 (新潟県)



田んぼダム取組面積 (新潟県)



田んぼダムのぼり (新潟県)



調整金具 (白根郷土地改良区)

令和2年度は県内17市町村15,654haで取組み

■ 田んぼダムの実施例（宮城県）

古川農業試験場での試験 (古川)



田んぼダム試験農場



田んぼダムと定点観測

田んぼダムの適用と田んぼ・排水路での水位観測
排水柵の開発

実施例



上沼地区 (栗原市)



八木地区 (栗原市)

地区スケールの問題を解決するために実施
広い流域規模での実施には至らず

◎ 研究実施例（宮城県と東北大）

- 2017年度：宮城県・東北大で打合わせ・視察
- 2018年度：宮城県・東北大・農工研で打合わせ
- 2019年度：修士課程学生が研究開始 (東北大)
- 2020年度：宮城県・東北大で打合わせ・視察



視察 (2018年3月)



視察 (2020年12月)

■ 田んぼダムの課題

効果の算定

河川計画の中でどのように田んぼダムの効果を考慮するのか

- * 水田面積×水位 = 貯水量 では不十分
 - ・ 期待できそうな地域は分かるが.
- * 排水路を考慮する必要がある
 - ・ 通常の流量解析では考慮しない
 - ・ 排水路網のデータは入手困難

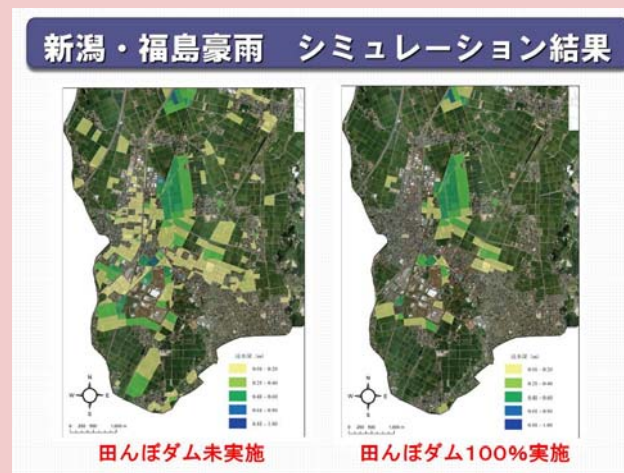
一級河川流域全域等で田んぼダムの効果を算定することは極めて困難か、手間や費用がかかる現状

流域治水の枠組みは既に日本全国で検討、適用性が高い統一的な算定手法が必要

農家の方々の協力が必要

協力にあたり理解を得ることが必要
一級河川の流域だと、その実施効果は目に見えにくい。

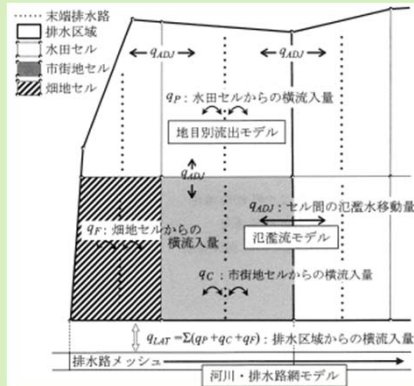
- * 実施効果の算定がやはり重要



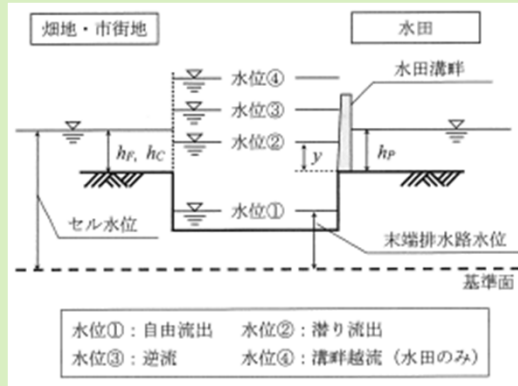
田んぼダム実施効果の可視化例 (見附市)

■ 田んぼダムモデル（「効果の算定を目指す」学術的試み）

田んぼダムモデル (宮津ら 2012)



モデルの構成 (宮津ら 2012)



各土地利用と流出過程 (宮津ら 2012)

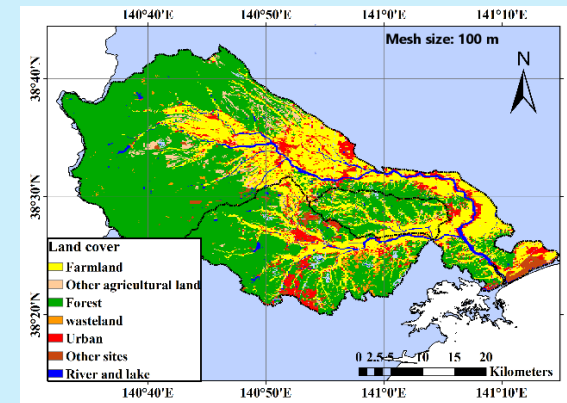


対象領域のモデル化 (宮津ら 2012)

- ・各土地区画・排水・河川・氾濫を詳細・忠実に表現する領域モデル
- ・領域の情報が得られれば、高精度に計算を実施できる。田んぼダム効果を多くの領域で算定してきた実績を有する。

広域での効果算定に向けて

- ・ 目的を流域全体の効果算定に主に外水氾濫を想定
- ・ 適用性が高いモデルを目指す 日本全域に適用可能とする



鳴瀬川流域の土地利用 (国土数値情報)

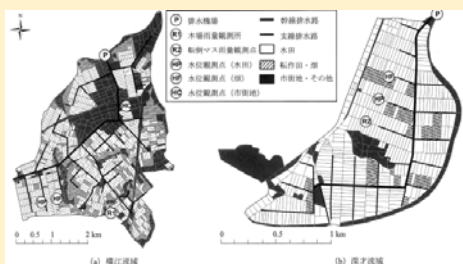
- ・ 各水田における一時的な貯水は考慮
 - ・ 排水路の過程は考慮しない
- 土地被覆データのみで解析可能

■ 田んぼダムモデル（東北大学モデルの特徴・狙い）

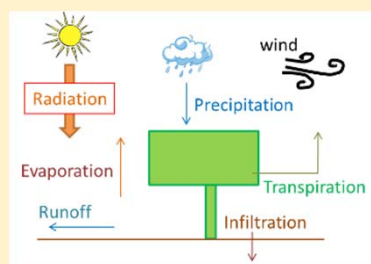
東北大モデル：一次元田んぼダムモデルでの潜在的効果算定

目的・特徴：広域に適用可能であること，潜在的効果の算定モデルであること
⇒ 日本全国での田んぼダム効果の算定，気候変動の適応策としての効果

一次元モデル：高い適用性



排水路網 (宮津ら 2012)



【参考】陸面過程モデル
(鉛直一次元)

田んぼ内に一時的に貯留される水量を考慮して，「降雨量の時系列」から「流出量の時系列」を作成する

潜在的効果

排水過程 (田んぼから河川) を考慮しないため，田んぼの貯水効果のみを考慮した解析。考察の仕方が鍵となる

【考察例】田んぼダム適地の判定

◎考慮できる要素

田んぼ面積と出水規模の関係

田んぼ・河川・受益地の位置関係

◎考慮できない要素

低平地で排水が困難な地域



モデルの構造と鳴瀬川における適用例

東北大学 工学研究科 土木工学専攻

峠 嘉哉

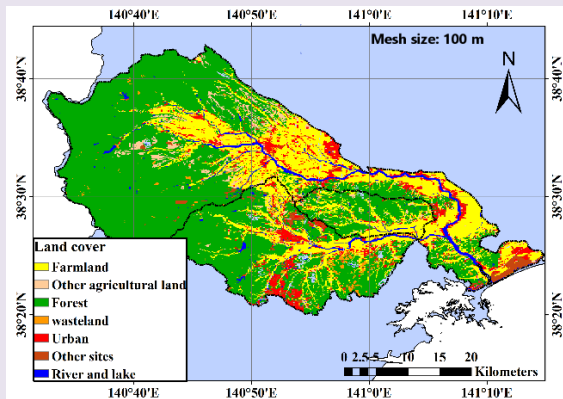
■ 一次元田んぼダムモデル

構築モデルの概要

流域全域への適用が可能な簡易的な鉛直一次元モデル
計算負荷が少なく，土地被服データのみで解析可能

全ての田んぼメッシュが洪水緩和機能を発揮した
場合の流域全体での潜在的な洪水緩和機能の評価

田んぼメッシュと流域の表現



土地利用データ（国土数値情報）

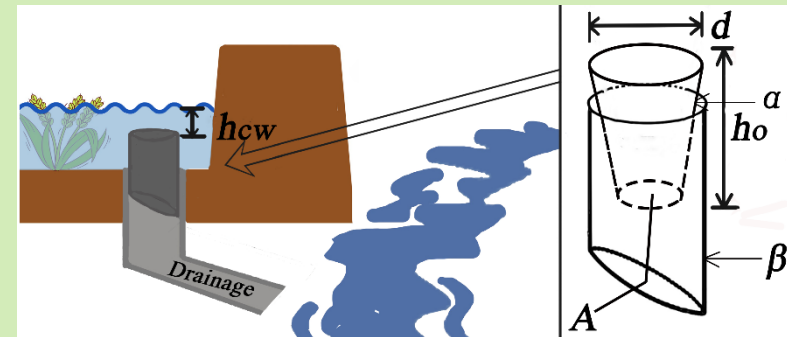
90×90mメッシュに
一枚の田んぼがあると
設定

田んぼダムからの排水は直接河道に与え
排水路は考慮しない

氾濫解析時には田んぼダム内の水位は考慮しない

オリフィスからの流量

Miyazu et al. (2017)を基に，オリフィスと円筒管の流量が少ない方を排水量とする



オリフィス $q_{PO} = C_{PO} A \sqrt{2g(h_{CW} + h_o)}$

円筒管 $q_{PCW} = \sqrt{C_{PCW} g d^5 (h_{CW}/d)^3}$

C_{PO} : オリフィスの流量係数

C_{PCW} : 円筒管の流量係数

g : 重力加速度

■ 一次元田んぼダムモデル

◎ 田面水位の計算式

$$\text{排水流量} \begin{cases} q_{PO} = C_{PO} A \sqrt{2g(h_{CW} + h_D)} \\ q_{PCW} = \sqrt{C_{PCW} g d^5 (h_{CW}/d)^3} \end{cases}$$

宮津ら (2017) と同様の手法

$$\text{田面水位} \quad \frac{dh_w}{dt} = -\frac{Q}{A_P} + R - L$$

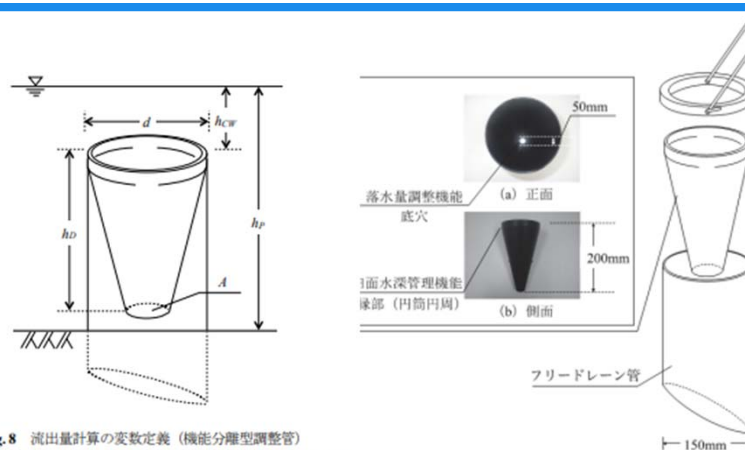


Fig. 8 流出量計算の変数定義 (機能分離型調整管)
Concept of the runoff calculation model for the function-independent runoff control device of paddy field dam

Fig. 6 機能分離型調整管
The function-independent runoff control device of paddy field dam

オリフィスの構造 (宮津ら 2017)

q_{PO}	m^3/s	オリフィス式で計算した流出量	h_{CW}	m	フリードレーン管天端を基準とした田面水位
C_{PO}		オリフィスの流量係数	h_D	m	フリードレーン管天端—流出高孔間距離
A	m^2	孔断面積	h_P	m	田面水位
g	m/s^2	重力加速度	t	s	時間
q_{PCW}	m^3/s	円筒堰の公式で計算した流出量	A_P	m	水田面積
C_{PCW}		円筒堰の流出係数	R	m	降雨量
d	m	フリードレーンの管径	L	m	減水深

■ 鉛直一次元田んぼダムモデル

貯水量・水位変化

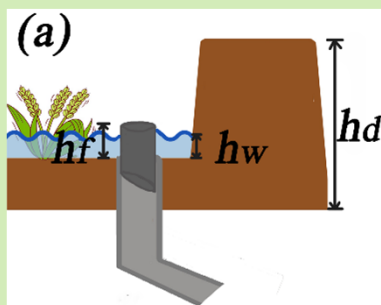
田んぼダム内の水位は降水強度と排水能力との差で決定する。

$$\frac{dh_w}{dt} = -\frac{Q}{A_p} + R - L$$

h_w 田んぼダム内水位
 Q 排水量
 A_p 田んぼの面積
 R 降水強度
 L 越水による水位変化量

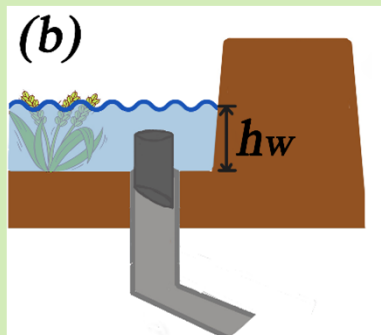
■ 解析設定

- ・空間解像度90m
- ・時間間隔1時間
- ・田んぼダム初期水位5cm
- ・入力データ
レーダー・アメダス解析雨量
国土数値情報（土地利用）



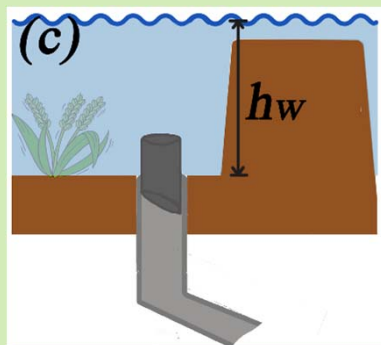
■ 排水開始前 $h_f < h_w$

田んぼダム内の水位が排水口より低いため排水が生じない。排水開始までの貯水量を「初期貯水量」とし、 h_w 値で操作可能（田んぼダムの初期水位に農業操作を考慮）



■ 排水開始 $h_w < h_f < h_d$

田んぼダム内の水位が排水口より高くなり、排水が開始される。排水量は h_f と h_w の水位差で決まり、「実貯水量」は降雨強度と排水能力との差で決定される。（この時、排水路の水位は考慮していない）



■ 越水開始 $h_f < h_w$

田んぼダム内の水位が田んぼの淵の高さを超えるため、 h_d を超える水量は直ちに排水される。

台風19号での解析では、越水が生じないように h_d を十分高く設定した(50cm)。

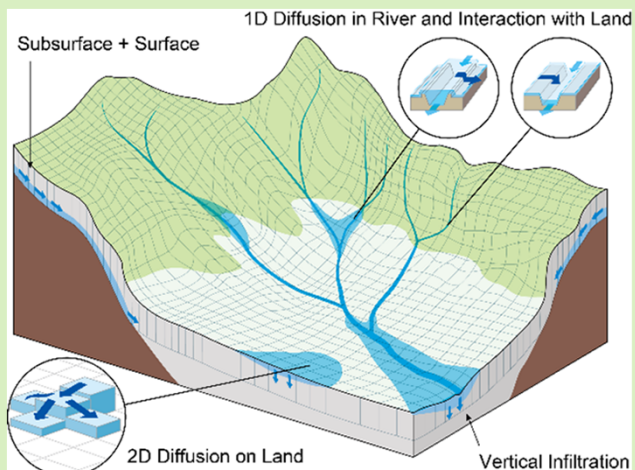
■ RRIモデル

◎ RRIモデル（降雨流出氾濫モデル）

「一次元」の田んぼダムモデルの結果を元に、「二次元」の水移動を計算するモデルが必要
氾濫被害の低減効果を算定するためRRIを用いる

下記を流域一体で予測するモデル

- ・流域に降った雨が河川に集まる現象
- ・洪水が河川を流下する現象
- ・河川を流れる水が氾濫原に溢れる現象



RRIモデル (ICHARM)

基本式

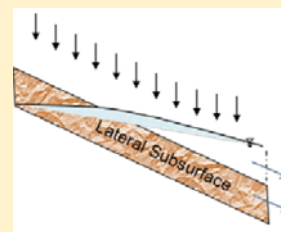
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = r - f \quad (1) \quad \text{(連続式)}$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial uq_x}{\partial x} + \frac{\partial vq_x}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho_w} \quad (2) \quad \text{(運動保存則)}$$

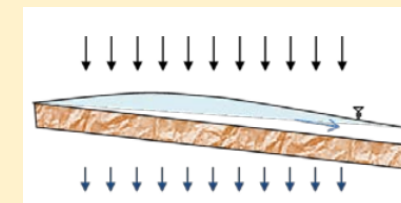
$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial uq_y}{\partial x} + \frac{\partial vq_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho_w} \quad (3) \quad \text{(運動保存則)}$$

$$\frac{\tau_x}{\rho_w} = \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (4) \quad \text{(Manning式)}$$

$$\frac{\tau_y}{\rho_w} = \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (5) \quad \text{(Manning式)}$$



山地での出水



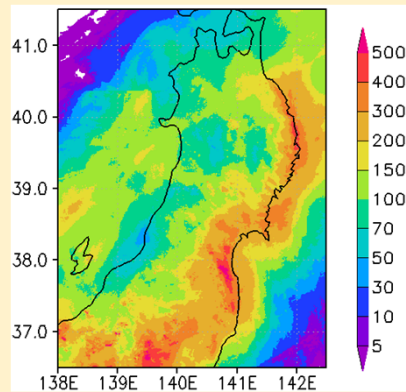
低平地

山地では中間流と表面流出を考慮し、
平地では浸透と地表流を考慮する

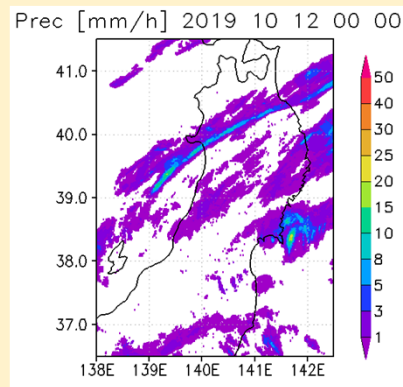
■ 鳴瀬川流域を対象とした効果の算定（降雨量の設定）

◎ 令和元年台風19号豪雨

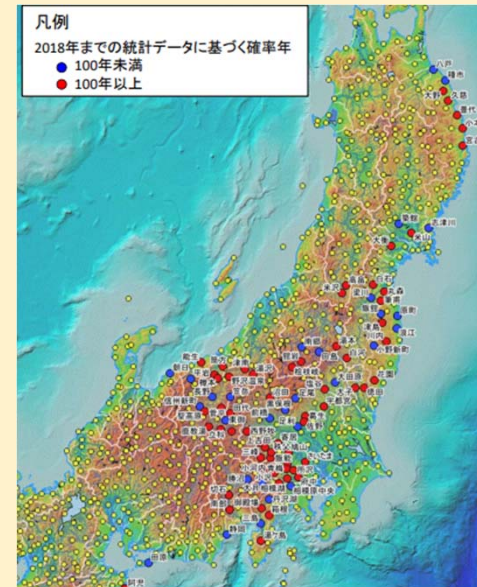
令和元年台風19号により，宮城県の各地でも100年確率規模を超える豪雨が生じた（国交省）



台風19号による降雨分布
(レーダーアメダス解析雨量)



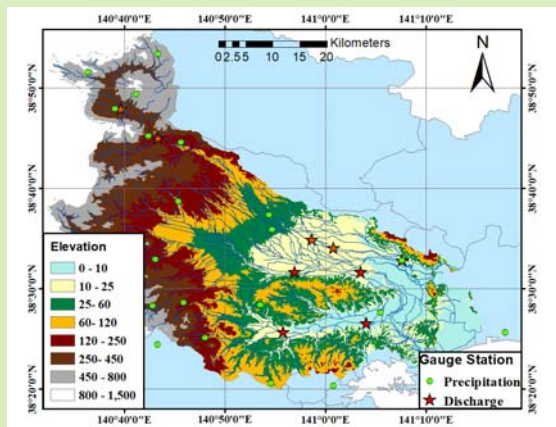
30分毎の降雨強度
(解析雨量)



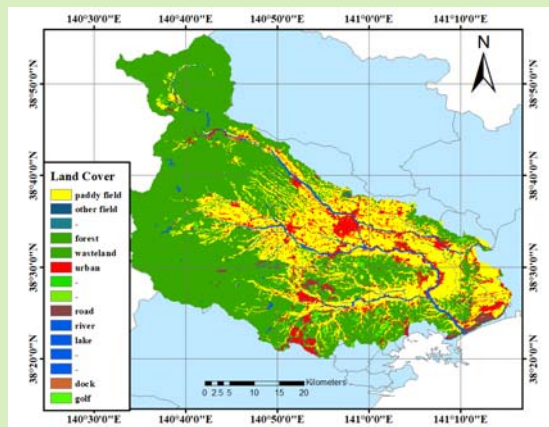
台風19号豪雨の確率年 (国交省)
赤点：100年確率以上
青点：100年確率未満

- ・ 実際に生じてしまった災害への詳細な検討として
- ・ 現実の豪雨（降雨時系列・空間分布）に基づいて適用性・効果の検討が必要。将来・他県等に宮城県の知見を活かす。

■ 鳴瀬川流域について



標高分布 (Merit DEM)



土地被覆の分布 (国土数値情報)

流域面積：1,130km²

流域人口：約18万人

急勾配の上流域と緩勾配の下流域

流域の22%が水田・畑地

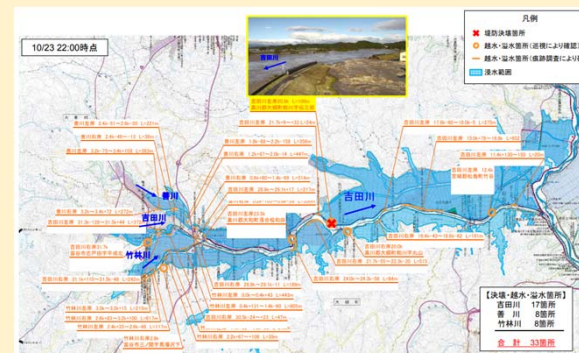
市街地が6%

◎ 鳴瀬川流域で検討する上でのポイント

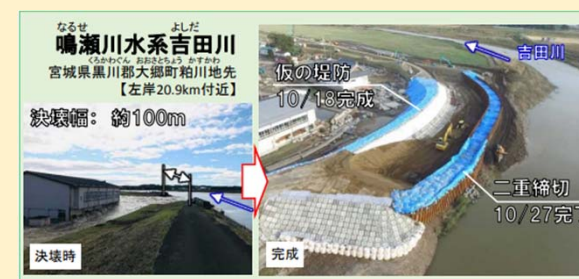
- ・ 広い水田面積を有し，田んぼダム効果は大きいと見込まれる
- ・ 現実に豪雨被害があった地域であり，検討する意義が大きい
- ・ 低平地に水田が分布するので排水の効果も大きいと考えられる
- ・ 鶴田川や新江合川等を考慮する必要がある

◎ 台風19号による被害

流域全域で多数の決壊・越水・溢水が生じた。吉田川の決壊地点で最大の被害となった。



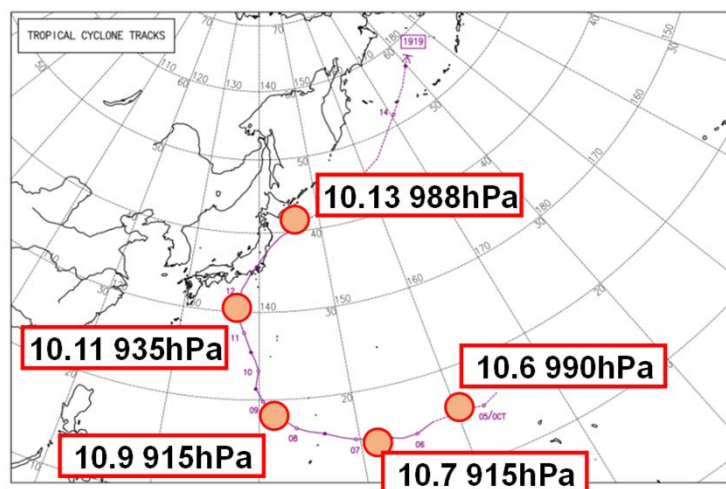
決壊・越水・溢水箇所 (国交省)



決壊箇所の様子 (国交省, 2019)

■ 台風19号豪雨について（気象条件）

令和元年10月台風第19号の概要

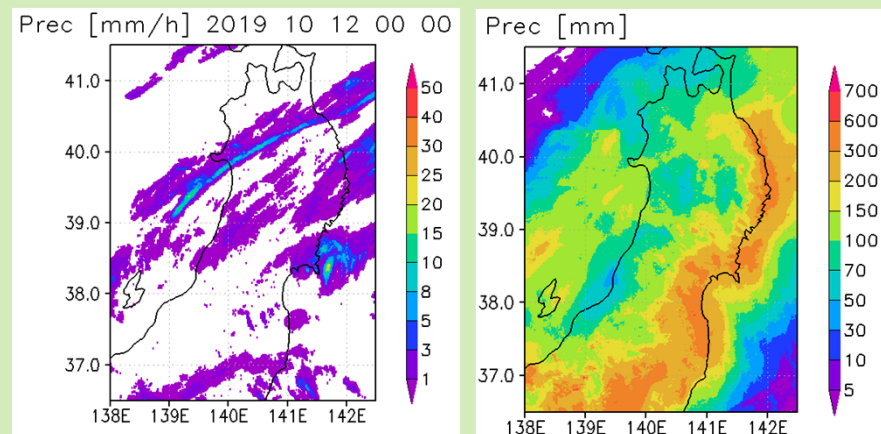


台風19号の経路速報値と中心気圧
(台風経路(気象庁), 中心気圧(過去天気: 日本気象協会))

令和元年台風第19号（ハギビス）

- * 10月6日発生, 10月12日上陸
- 「強い」・「大型」の台風で静岡に上陸
- * 狩野川台風(1958年)に似た経路・勢力
- * 1都12県に特別警報（過去最多）
- 関東から東北地方の各地で記録的な豪雨が発生

台風に伴う豪雨の概要



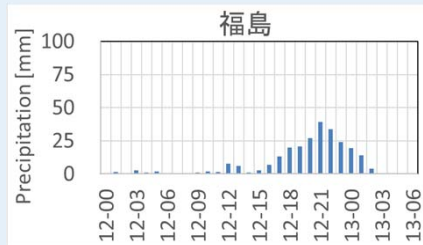
30分毎の降雨強度
(解析雨量)

10月11,12日の2日間雨量
(解析雨量)

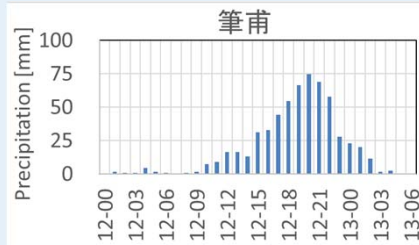
- 台風の通過に伴って関東・東北域で豪雨が発生
- * 全国120地点で12時間雨量の記録を更新
 - 三陸沿いは3~6時間雨量の記録更新も多かった
 - * 気象庁の解析によると, 東北域の豪雨の要因は, 台風の北側に生じた前線と地形の双方の影響があったとのこと (気象庁速報資料, 2019)

■ 台風19号豪雨について（気象条件）

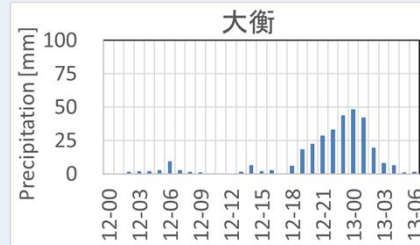
主な観測点における降雨量の時間変化



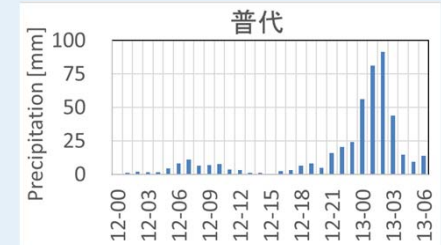
福島観測所(福島県福島市)



筆甫観測所(宮城県丸森町)

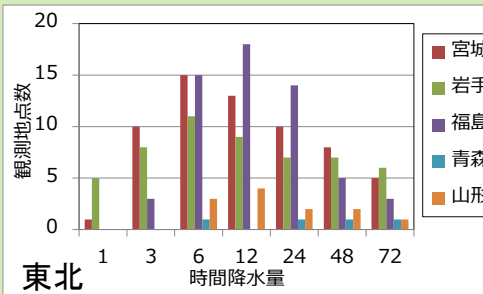
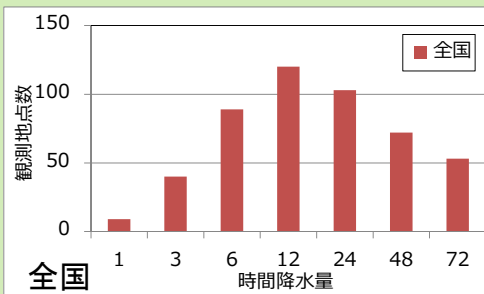


大衡観測所(宮城県黒川郡)



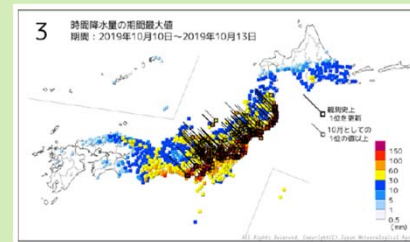
普代観測所(岩手県下閉伊郡)

観測記録でみる豪雨の傾向

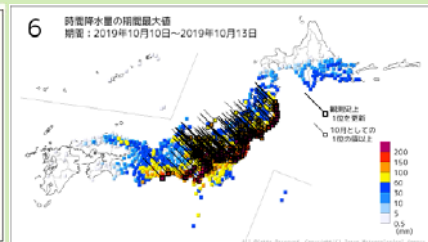


降雨の観測記録を更新した地点数

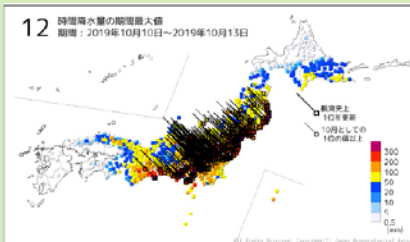
全国と福島県では12時間雨量での記録更新が多いが、岩手県・宮城県ではより短時間に集中した豪雨の傾向



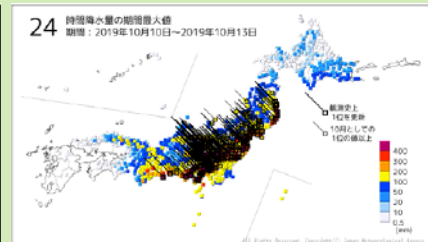
3時間降水量 (気象庁)



6時間降水量 (気象庁)

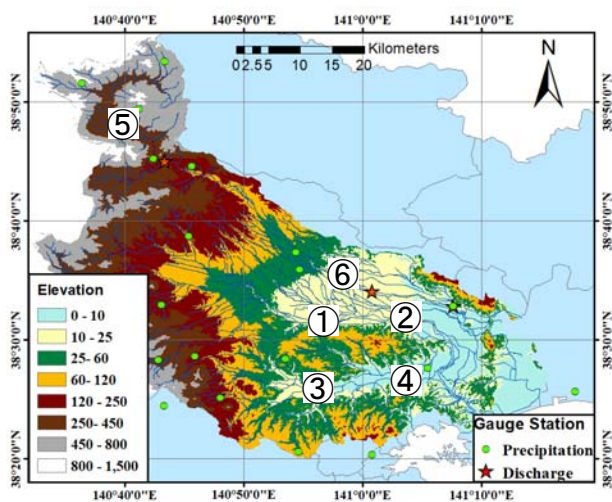


12時間降水量 (気象庁)



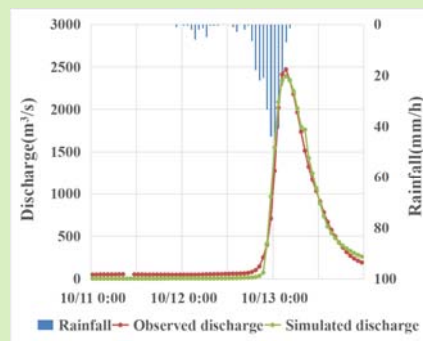
24時間降水量 (気象庁)

■ 台風19号（再現計算結果 1）

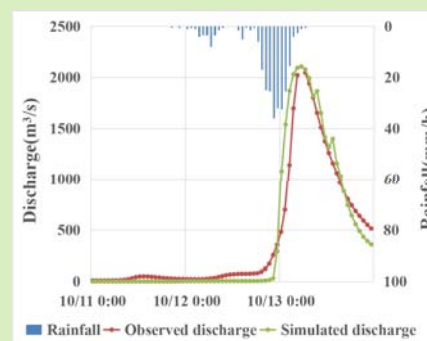


鳴瀬川流域の流量観測所

◎ 鳴瀬川流域

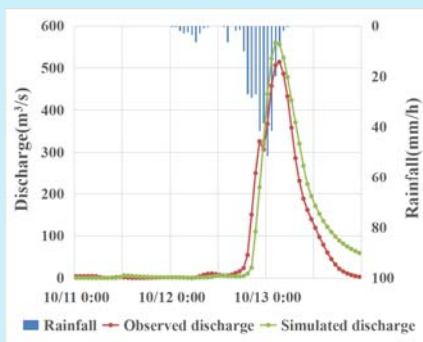


① 三本木橋

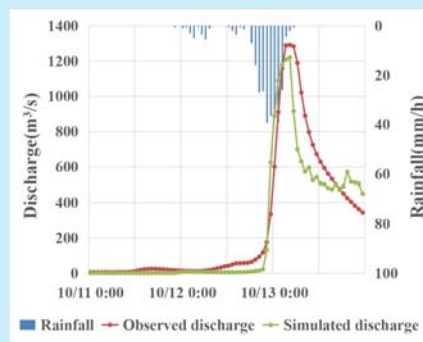


② 野田橋

◎ 吉田川流域

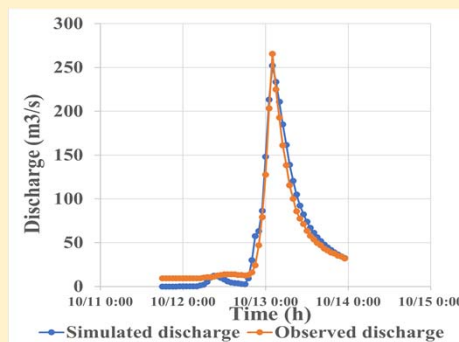


③ 落合

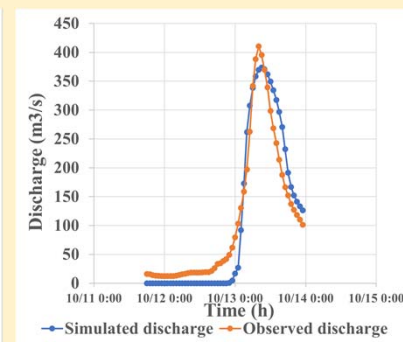


④ 幡谷

◎ 江合川流域

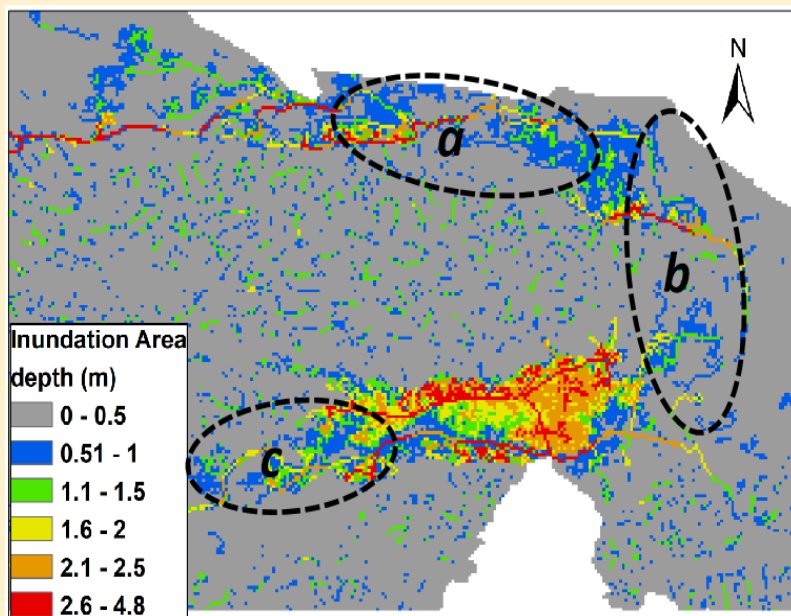


⑤ 轟



⑥ 下谷地

■ 台風19号（再現計算結果 2）



RRIによる浸水深分布



台風19号による浸水深分布 (国交省)

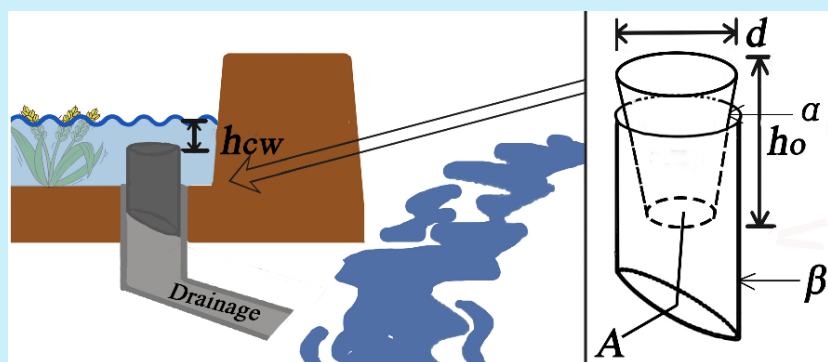
◎ 氾濫解析の再現結果

吉田川流域の浸水領域は比較的高い精度で再現できたが（左図のc領域），
鳴瀬川流域の下流部b領域では氾濫が生じなかった
氾濫・決壊の考慮，パラメータのキャリレーション設定等が必要である．

■ 田んぼダムモデルについてのシナリオ分析と狙い

◎ オリフィスのフリードレン高さ

個々の水田の貯水量を変化させるシナリオ



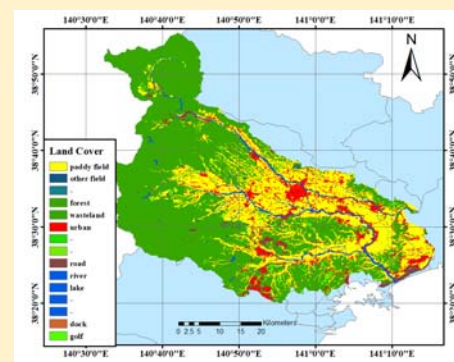
オリフィスと田んぼダム

h_{cw} : フリードレンの地上からの高さ
0cm, 5cm, 10cm, 15cm, 20cm, 25cm, 30cm

田んぼダム貯水量の流量感度実験の位置づけ
実際に許容可能な田んぼダム最大水位は、
圃場整備：有り30cm, 無し15cm

◎ 田んぼダム適用割合

田んぼダムとして利用する水田の割合を変化

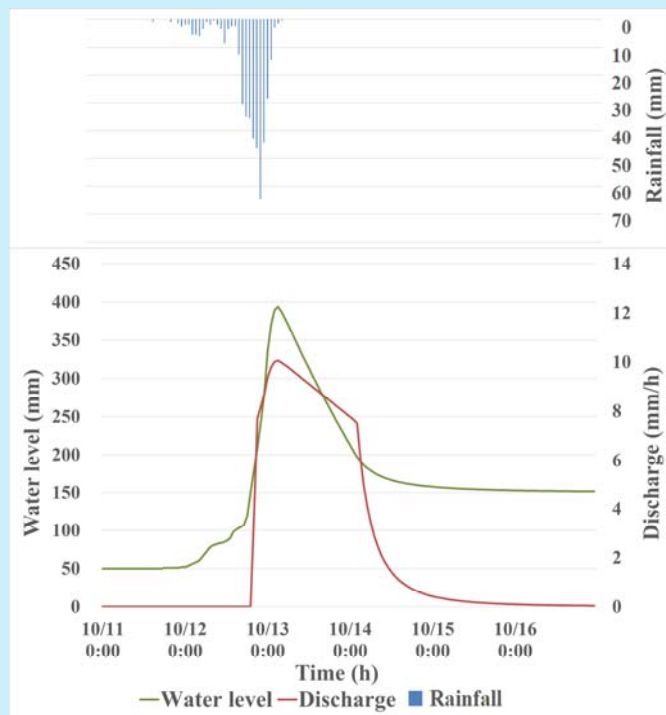


土地被覆の分布 (国土数値情報)

田んぼダムの適用率
0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%

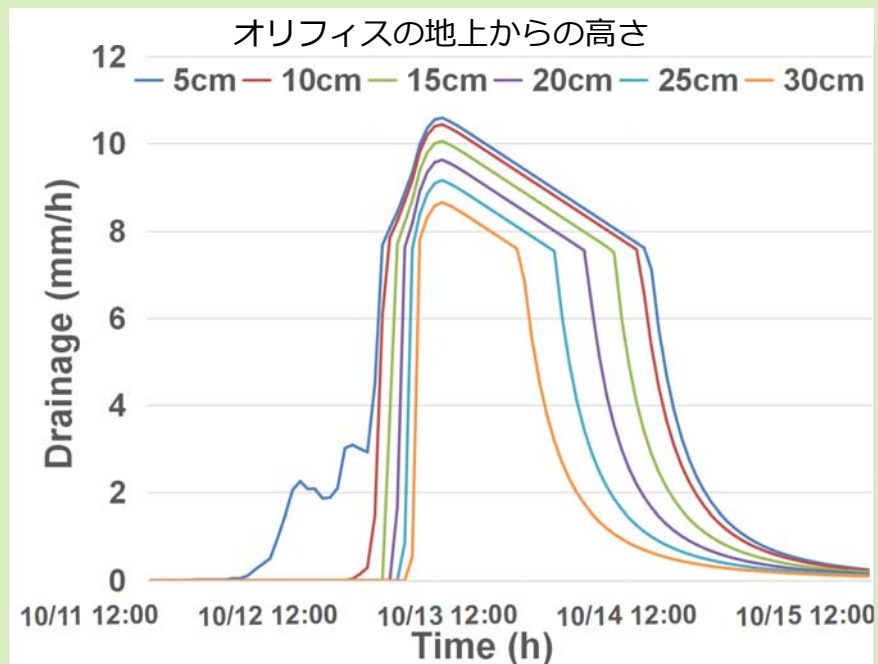
適用割合100%の解析のみでは参考にならない
流域で一様な適用密度になるように選定

■ 田んぼダム適用結果（流出量の時空間分布）



降水量に対する水位と流出量の関係
(Hf=15cm時)

降水量のピーク値が60mm/hを超える中で、流出量のピークを約10mm/hに抑えられた。

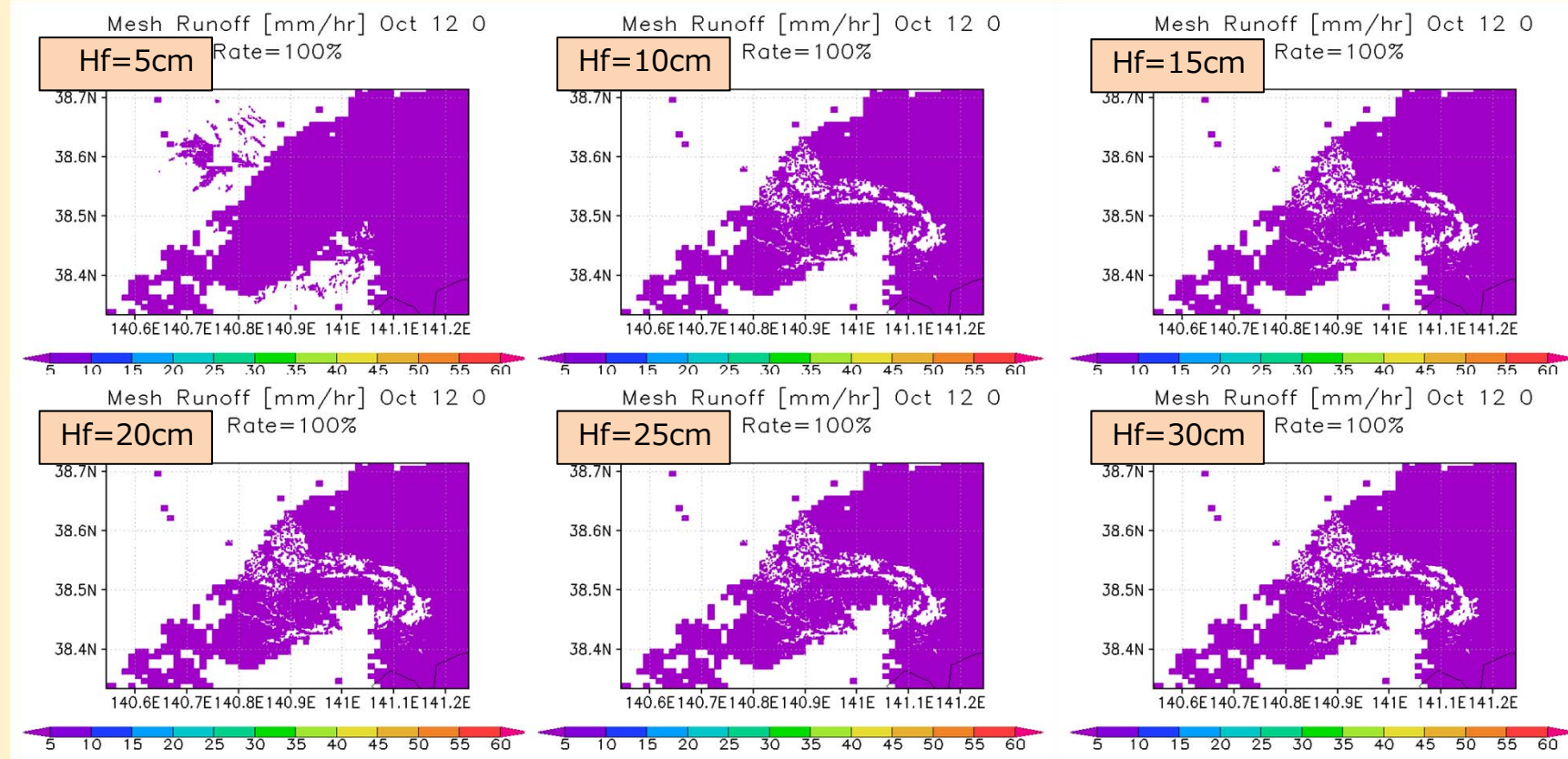


フリードレーン高さ毎の流出量時系列

オリフィスの高さが高いほど貯留効果が高いことが分かった

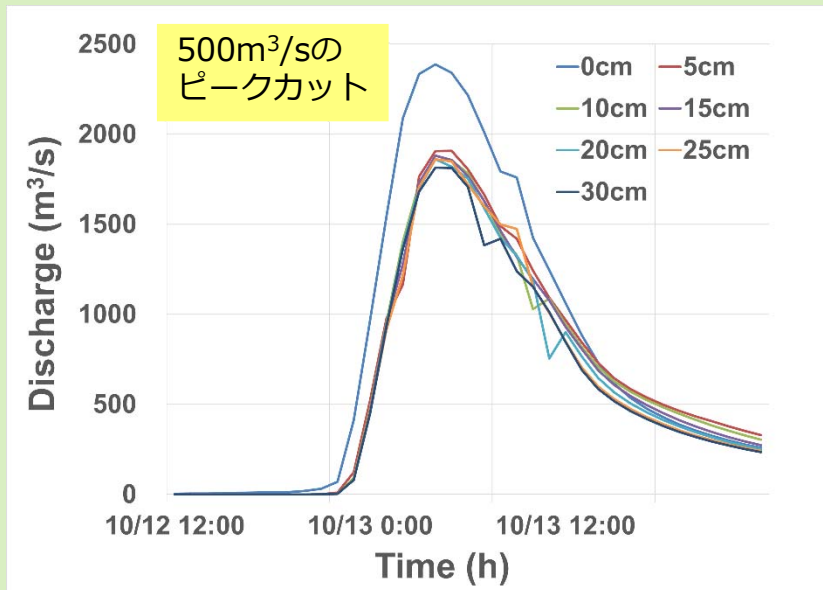
Hf=5cmであっても、田んぼ内の実水位はより高いので十分に流出量低減効果がある。

■ 田んぼダム適用結果（流出量の時空間分布）

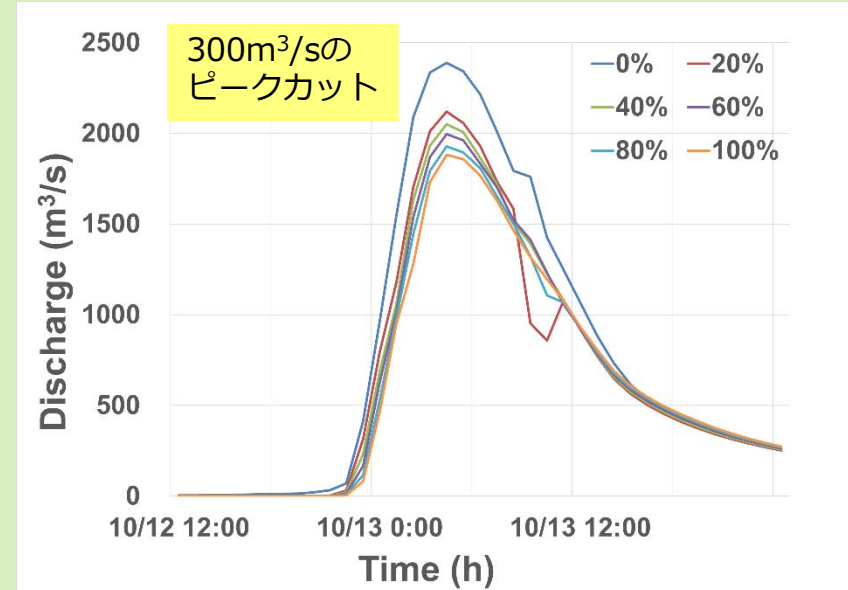


- ・ 田んぼダム上で流出量が遅れて生じていることが分かる
- ・ 流出が始まるタイミング・ピーク量がHf値によって異なる
- ・ Hf=5cmでも流出量が大きく異なる。

■ 田んぼダム解析結果・河川流量の結果（シナリオ別）



フリードレン高さ毎の流量 (三本木橋)



田んぼダム適用割合毎の流出量時系列 (三本木橋)

◎ 鳴瀬川流域における田んぼダムのシナリオ解析の結論

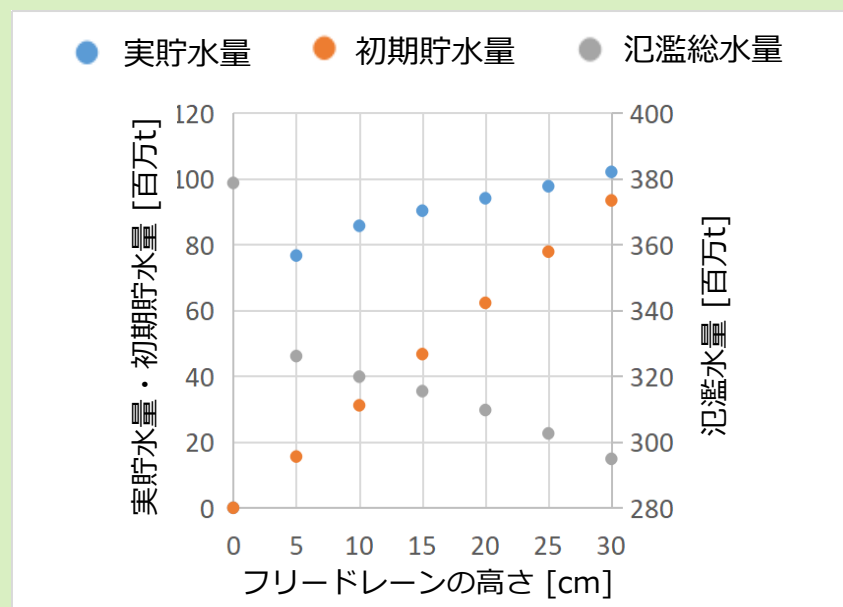
- ・シナリオ間の違いよりも、田んぼダムの有無の方が差が大きかった。
⇒ オリフィスより下側の水量のみでなく、実水位を考慮することが重要であることを示す。
⇒ $H_f=5\text{cm}$ でも約 $500\text{m}^3/\text{s}$ 、適用割合20%でも約 $300\text{m}^3/\text{s}$ のピークカットを実現できた。
- ・適用効率20%でも効果が高かった。

■ 田んぼダムシナリオ別の効果の算定

実貯水量：田んぼメッシュ毎の最高水位の流域総和

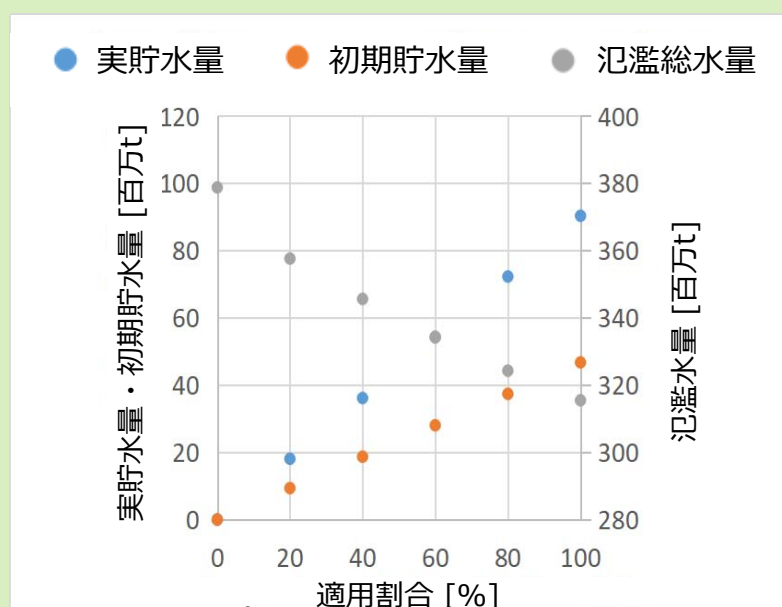
初期貯水量：オリフィス下側の貯水量の流域総和

氾濫総水量：メッシュ毎の最高浸水深の流域内総和



オリフィスの高さ毎の田んぼダム貯水量・氾濫水量

- ・ 実貯水量が初期貯水量を大きく上回った
特に $h_f=5\text{cm}$ シナリオで差が大きかった
- ・ 氾濫水量は徐々に減少した。

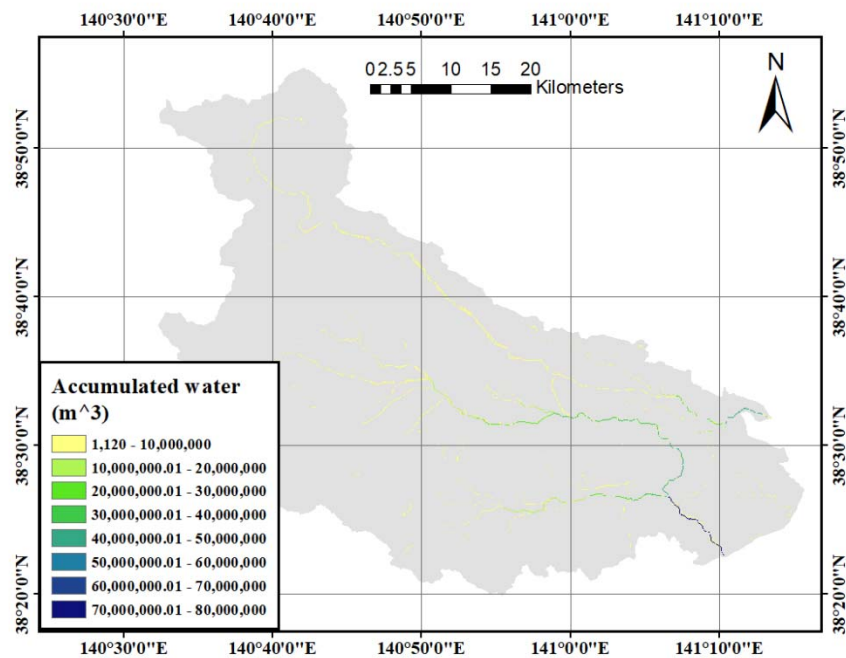


田んぼダム適用割合毎の田んぼダム貯水量・氾濫水量

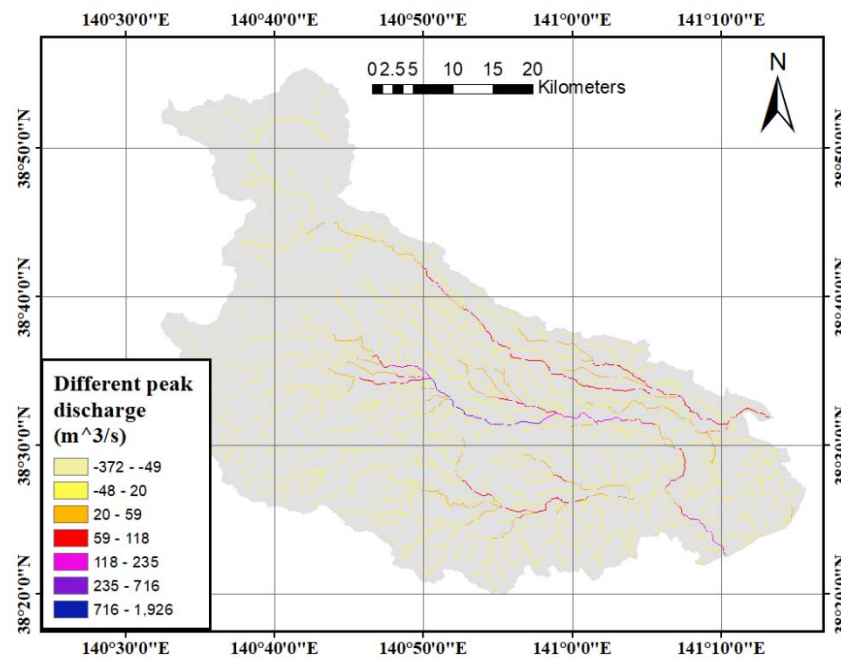
- ・ 貯水量・氾濫水量はほぼ線形に変化した。
- ・ $H_f=15\text{cm} \rightarrow 30\text{cm}$ による氾濫水量の減少は、
適用割合40% \rightarrow 80%と同等だった

■ 田んぼダム実貯水量とピークカット効果の流域内分布

田んぼ面積率や圃場整備率によって洪水緩和効果は領域により異なる
 流域内のどの辺りで高い効果が期待できるのか（流域内比較, 流域間比較）
 ⇒ 圃場整備率の空間分布・排水効果も含めた検討（将来展望）



累積田んぼダム実貯水量（台風19号事例）



田んぼダムによるピークカット効果（台風19号事例）

■ まとめ（鳴瀬川流域）

- 一次元田んぼダムモデルの構築
 - 広域に適用可能な一次元モデルを構築した.
 - 流域間比較・流域内比較を可能にする.
 - 排水過程を考慮できない
- 台風19号事例における田んぼダム検討
 - 鳴瀬川流域全体で計9000万 m^3 の実貯水量（100%適用割合時）
 - フリードレインの高さが最小の5cmに設定でも高い効果
 - 初期貯水量(フリードレイン下の貯水量)ではなく、実貯水量が重要
⇒ 田んぼダムモデルによる算定が必要であることを示す.
 - フリードレインや適用割合の各シナリオで、最低でも300, 500 m^3/s のピークカット効果が得られた