



平成15年7月九州豪雨災害(飯塚市浸水状況)
国土交通省遠賀川河川事務所提供

都市域を対象とした包括型氾濫解析モデルの開発

九州工業大学工学部建設社会工学科 水環境工学研究室
重枝未玲・秋山壽一郎

既存の氾濫解析モデル

- ★ 岩佐・井上・水鳥：氾濫水の水利の数値解析法（京大防災研年報，1990）
- ★ 福岡・川島・横山・水口：密集市街地の氾濫シミュレーションモデルの開発と洪水被害軽減対策の研究（土論，1998）
- ★ 末次・栗城：改良した氾濫モデルによる氾濫流の再現と防災への応用に関する研究（土論，1998）
- ★ 内田・見上・河原・湧河・幸：2004年出石川破堤氾濫における洪水被害調査と氾濫流解析に基づく検討（河川技術論集，2007）

- ★ 秋山・重枝・津崎・重岡：急流中小都市河川が貫流する密集市街地での浸水・排水プロセスのシミュレーション（水工論，2007）
- ★ 秋山・重枝：河道特性と市街地構造を考慮した越水・破堤氾濫シミュレーション（水工論，2006）
- ★ 秋山・重枝：飯塚市を中心とした都市域のダイナミック氾濫解析 -2003年7月遠賀川豪雨災害を対象として-，（水工論，2005）
- ★ 川口・末次・福留：2004年7月新潟県刈谷田川洪水・破堤氾濫流に関する研究（水工論，2005）

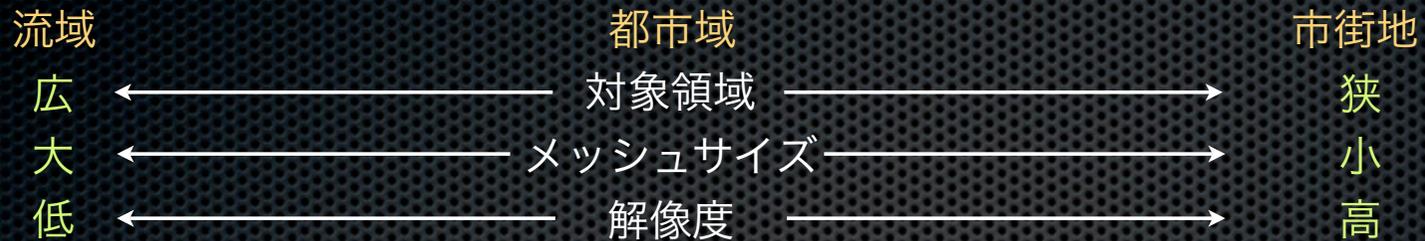
- ★ 戸田・井上・村瀬・市川・横尾：豪雨による都市域の洪水氾濫解析（土論，2000）
- ★ 川池・中川・市川・丸山：平成18年7月豪雨による松江市内の都市水害に関する数値解析的検討（水工論，2007）

- ★ 武田・森田・松尾：下水道システムを考慮した氾濫解析の治水対策への適用（水工論，2007）
- ★ 辻本・本守・安倍・山田：氾濫シミュレーション手法の開発と東海豪雨災害の再現（河川技術論文集，2002）

- ★ 関根・河上：都市における内水氾濫と地下街浸水の被害予測に関わる数値解析（水工論，2002）
- ★ 戸田・栗山・大八木・井上：複雑な地下空間における浸水解析（水工論，2002）

氾濫解析モデルのタイプ

❖ 解析対象領域？



❖ 解析の対象？

内水氾濫

外水氾濫

❖ 予測する量？



解析の範囲, 対象, 求められる精度を踏まえ選択

統合型氾濫解析モデル

❖ 概要

◆ 解析対象領域

- ・ 流域 → 山地部／河川／下水道網／堤内地 etc.

◆ 各分割要素の特性に応じたモデル化

- ・ 概念モデル(降雨流出解析)
- ・ ダイナミックモデル(河道：1次元解析, 氾濫原：2次元解析)

◆ 本川を幹にして各分割要素を接合

- ・ 概念モデル
- ・ ダイナミックモデル
- ・ ハイブリッドモデル (概念＋ダイナミックモデル)

❖ 長所と短所

○ 長所

- ・ 広域（流域全体）を対象として解析できる
- ・ 標高, 土地利用データなど氾濫解析データ作成の労力をさほど要しない

× 短所

- ・ 広域の氾濫原（流域全体）を対象としているためにモデリングが粗い
- ・ 市街地構造等の氾濫原の詳細を取扱うことができない
- ・ 河川⇔堤内地（越流公式）など, 各分割要素間での接続法に課題が残る

ダイナミック型氾濫解析モデル

❖ 概要

- ◆ 解析対象領域
 - ・ 都市域・市街地
- ◆ 包括的なモデル化／分割要素に応じたモデル化
 - ・ 土地利用形態、氾濫流に固有の要素
- ◆ ダイナミックモデル
 - ・ 河道: 1次元 or 2次元モデル
 - ・ 氾濫原: 2次元モデル

❖ 短所と長所

- 長所
 - ・ 精度がよい（ただし、モデリング次第）
 - ・ 市街地構造等を取扱うことができる（ただし、モデリング次第）
 - ・ 分割要素間での水のやりとりを包括的に処理できる（ただし、数値解法次第）
- × 短所
 - ・ 広域の氾濫原（流域全体）を取扱うことは難しい
 - ・ 標高、土地利用データなど氾濫解析用データ処理に労力を要する
 - ・ 計算の負担が大きい

目指しているモデル

❖ 解析対象領域

- ・ **都市域**：市街地・河川（本川，支川（中小河川））を含む

❖ 解析の対象

- ・ **破堤氾濫を含む外水氾濫，内水氾濫**

❖ 予測する量

- ・ **水深，流速，氾濫流の広がり，流体力，水のやり取り**（堤内地⇔堤外地，堤内地⇔雨水排除システム）

❖ 解析対象領域？

流域

広

大

低

都市域

対象領域

メッシュサイズ

解像度

市街地

狭

小

高

❖ 解析の対象？

内水氾濫

外水氾濫

❖ 予測する量？

マス

（水深，湛水量）

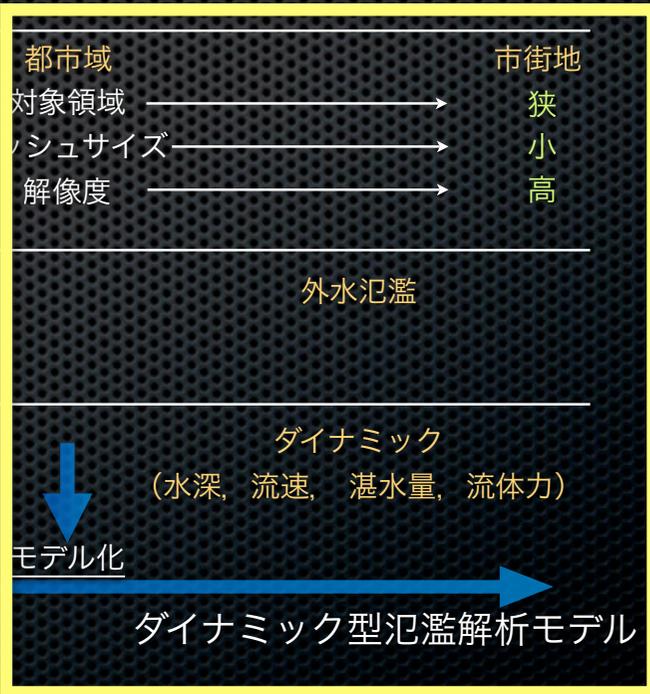
ダイナミック

（水深，流速，湛水量，流体力）

モデル化

統合型氾濫解析モデル

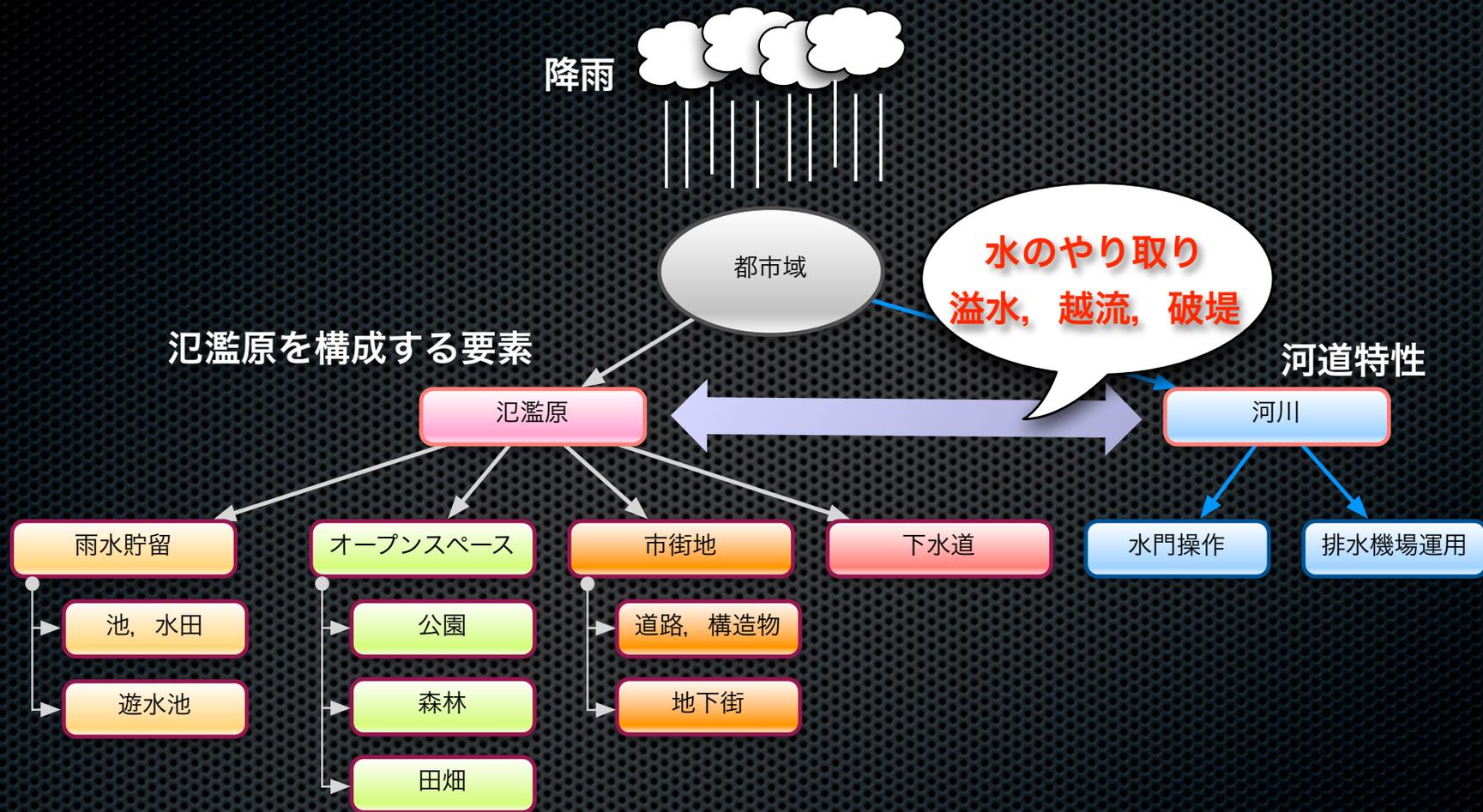
ダイナミック型氾濫解析モデル



❖ 都市域での流域対策に関係する以下の検討や評価を可能とする

- ・ 特定の地域への被害集中を避けるための**本川と支川との整合性**の検討
- ・ 河川の形状や特性(平面・縦断形状、緩流/急流河川、築堤/掘り込み河川など)を考慮した**堤外地から堤内地への氾濫のプロセス/堤内地から堤外地への逆流プロセス**の検討
- ・ 河川と下水道の連携を図った**水門操作、ポンプ排水の運用法、下水道による雨水排除**の検討
- ・ 越水による**破堤氾濫**や**逆破堤氾濫**の検討および氾濫流が構造物等に作用する**衝撃力**の評価
- ・ 水害防備林、霞堤や鉄道・堤防盛土、などを活用した**氾濫流の制御効果**の評価
- ・ 市街地構造等を踏まえた**ソフト面での流域対策**を策定するための基礎資料の提供など

都市域を対象とした氾濫解析で考慮すべき要素



都市域での氾濫解析では,

- 「**氾濫原を構成する諸要素**」と「**河道特性**」を適正に評価する必要がある。
- 「**氾濫流量**」などの「**水の収支**」を的確に評価する必要がある。

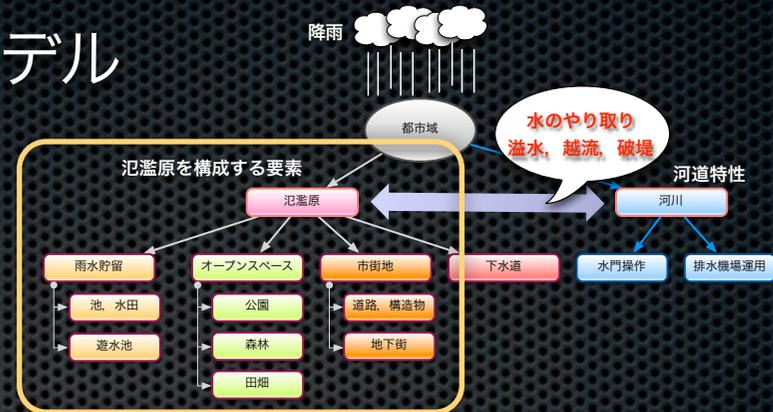
都市域を対象とした氾濫解析モデル

都市域氾濫解析モデル

【洪水流モデル】

+

【氾濫流に影響を及ぼす要素の取扱い】



【洪水流モデル】・・・SA-FUF-2DFモデル

Spatial Averaged Finite volume method on Unstructured grid using FDS technique for 2D Free surface flows model

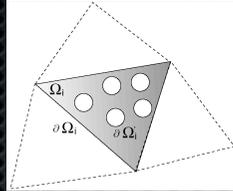
平面2次元・非定常・自由表面モデル

- ・ 基礎方程式：空間平均2次元浅水流方程式
 - 計算格子より小さな物体による流体力項の付加
- ・ 数値解法：流束差分離法(FDS), 有限体積法(FVM)
 - 高解像度+保存性
- ・ 計算格子：非構造格子
 - 効率良く, 適正に計算セルを配置

【氾濫流に影響を及ぼす要素の取扱い】

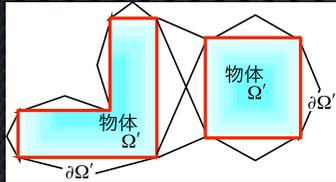
市街地構造（家屋・道路など），樹林帯，田畑などの取扱い

- ・ 計算セル $>$ 物体 \rightarrow **空間平均処理**



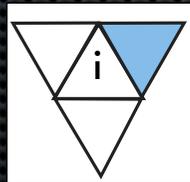
- ・ 密集度を考慮した抵抗係数
- ・ 粗度係数

- ・ 計算セル \leq 物体 \rightarrow **境界適合処理**



- ・ 計算格子を配置することで物体形状を表現
 \rightarrow 流体力を算定可能

- ・ 水没／非水没状態となる地形起伏の取扱い.



- ・ **ウェット／ドライ境界条件**

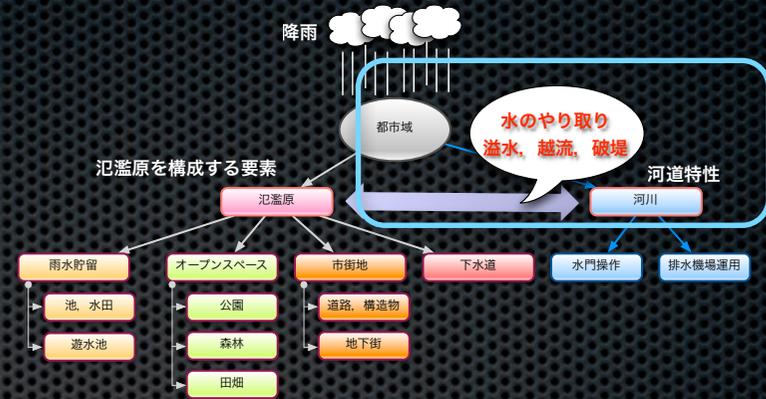
- ・ 降雨，雨水排除システム

- ・ **発生／消滅項**（簡易的な取扱い）

河道と氾濫原との水のやり取り



平成15年7月19日九州豪雨災害(飯塚市浸水状況)
国土交通省遠賀川河川事務所提供の写真を加工



完全越流状態

●河道特性

- ・線形
- ・縦断形 (勾配)
- ・横断形 (断面形)

●堤外樹林帯 など

潜り越流状態

●河道特性

●堤内地特性

- ・地形起伏
- ・市街地構造
- ・家屋群
- ・盛り土構造物
- ・堤内樹林帯

氾濫流量の評価



現行の氾濫解析

越流公式を内部境界条件として設け、洪水流(河道)と氾濫流(氾濫原)の雨水のやり取りを評価する方法が一般的

越流公式では堤外地・堤内地特性・境界の特性を考慮した越流公式が必要

都市域を対象とした包括型氾濫解析モデル

都市域を対象とした河道・氾濫原包括型氾濫解析モデル

【**洪水流モデル**】

+

【**氾濫流に影響を及ぼす要素の取扱い**】

+

【**河道に沿って格子を配置し、河道と氾濫原を平面2次元不定流モデルで包括的に取り扱う**】



1. 河道・氾濫原特性を考慮した上で、堤内外地での水のやり取りを**一体的**に解析できる
2. 流向に沿った流速と越流水深を予測できるので、**越流公式を用いずに氾濫流量を算定**できる
3. 空間積分に流束差分法を用いているので、常射流が混在するような破堤氾濫も適応可能.

包括型氾濫解析モデルの検証法

- 氾濫解析モデルがどの程度の再現性を有しているのか？

→ **不明**

理由：氾濫解析モデルの検証に資する十分な実氾濫データがない



氾濫解析モデル

- ・ テスト問題による基本性能の検証
 - ・ 水理実験（単純化された状況, モデル氾濫原）による検証
 - ・ 実際の氾濫原現象への適用・検証

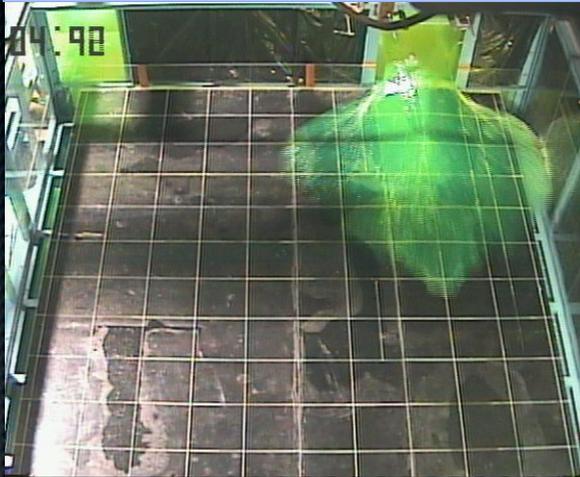


このようにして構築されたモデルはそれなりの再現精度を有しているだろう。

氾濫解析モデルの検証

～氾濫原～

①平面2次元洪水流数値
モデルの基本性能の検証



③水没・非水没状態となる
地形起伏の取り扱いの検証



②家屋・樹林帯などの取り扱い
の検証

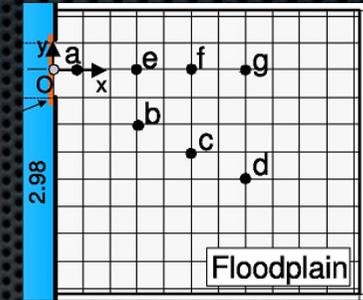
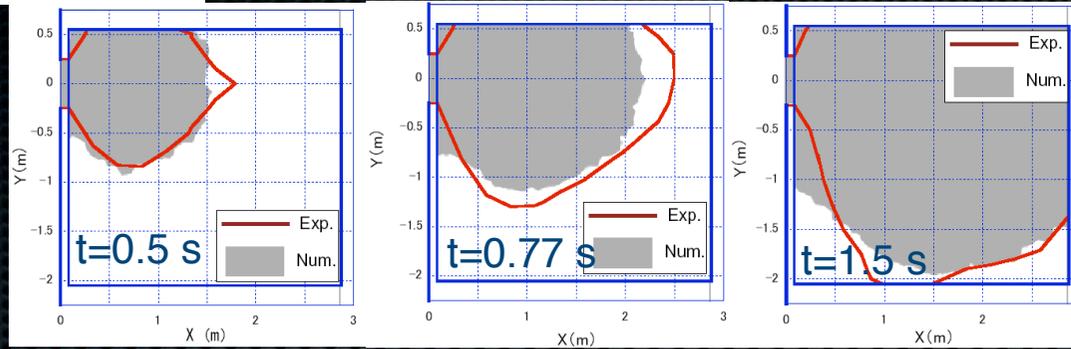


④複雑な構造を有する市街地
での総合的な検証

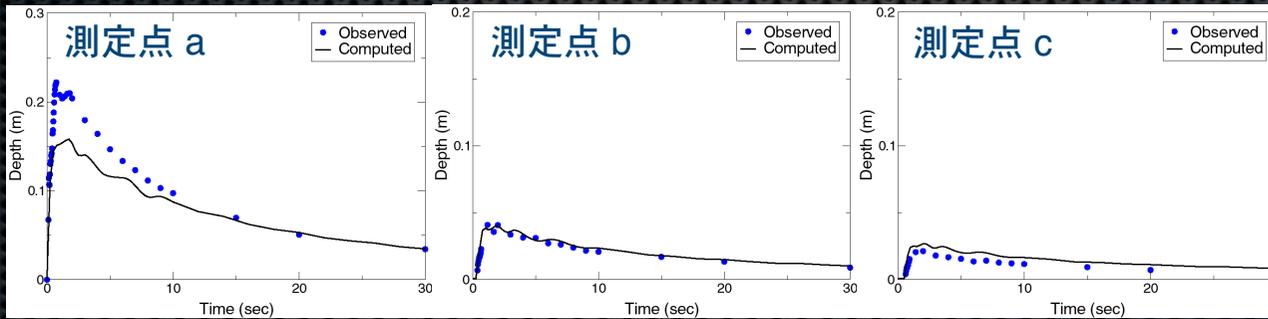


①基本性能の検証

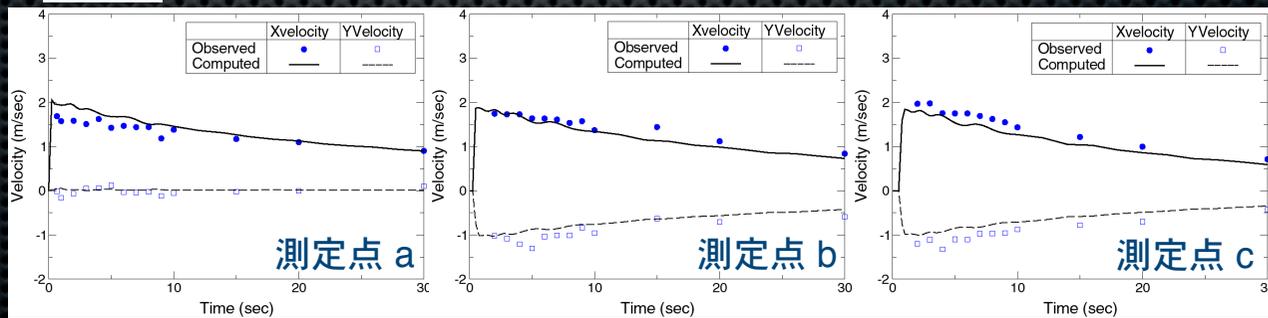
フロント位置



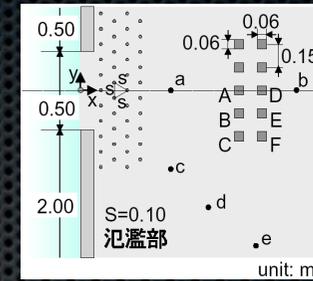
水深



流速



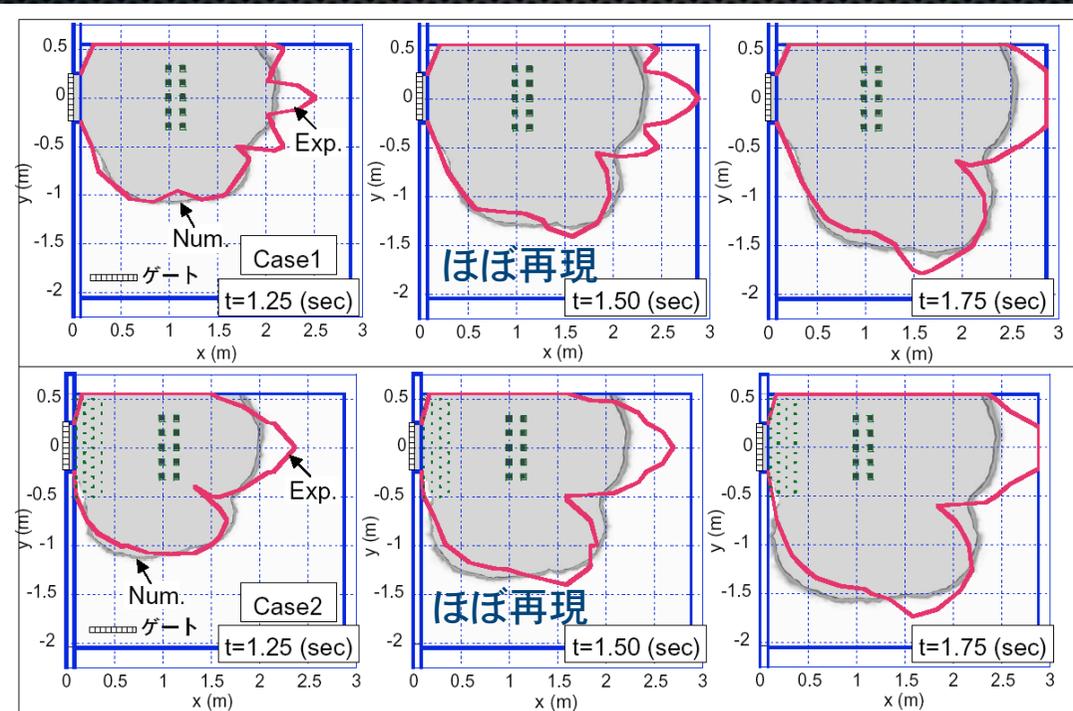
②家屋群・樹林帯の取り扱い ～フロント位置～



水害防備林無し(Case1)

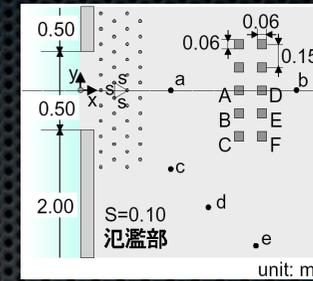


水害防備林有り(Case2)



水害防備林の設置による洪水氾濫流の減勢，フロント到達時間の遅延

②家屋群・樹林帯の取り扱い ~水深と流速~

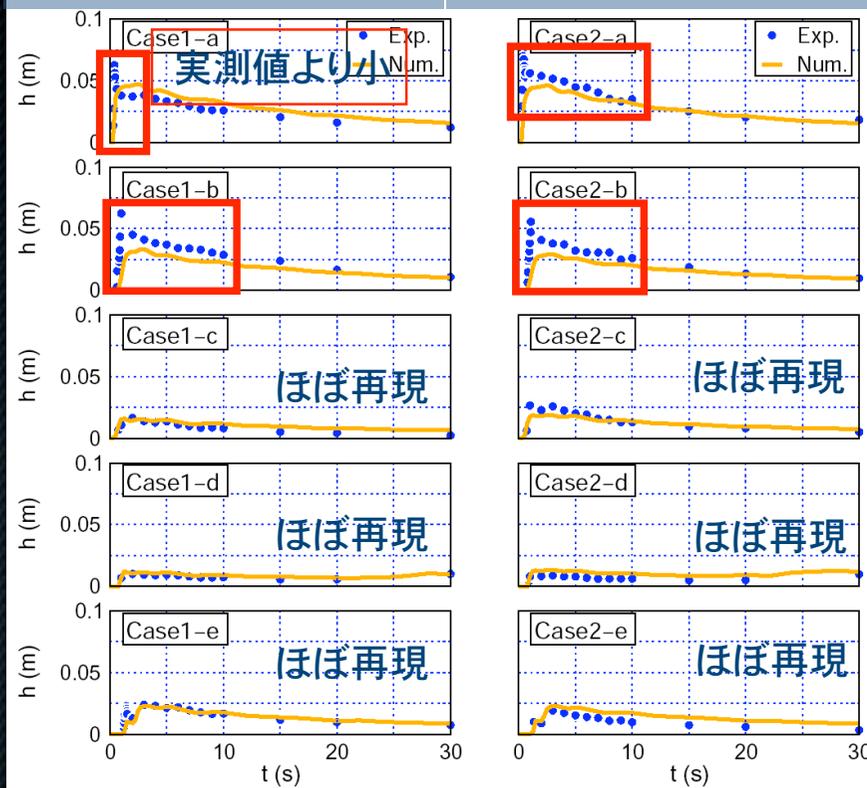


水深

流速

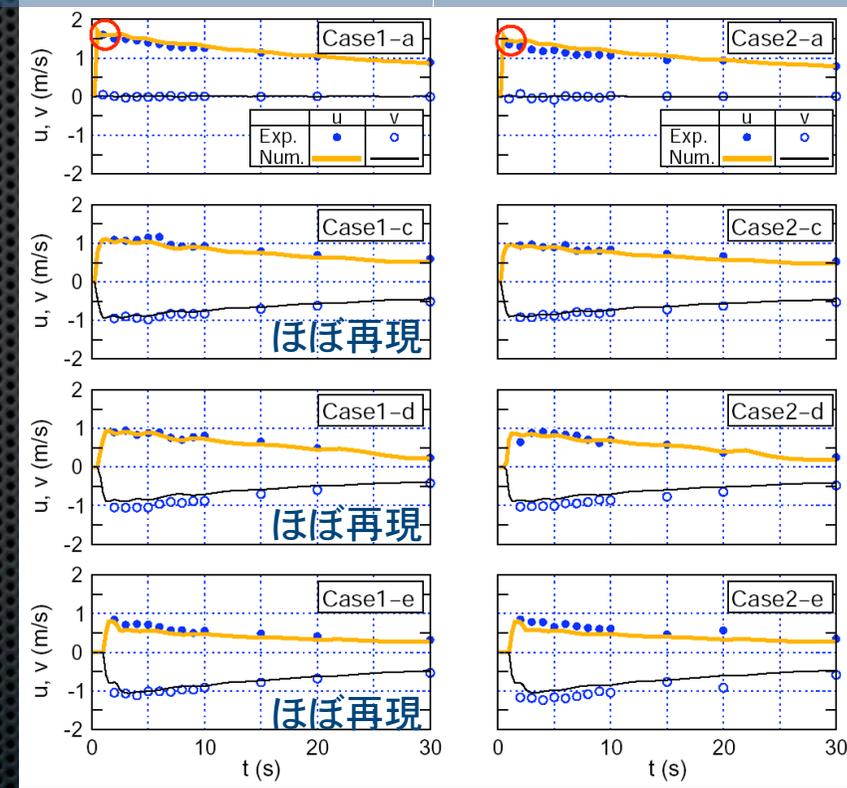
水害防備林無し(Case1)

水害防備林有り(Case2)



水害防備林無し(Case1)

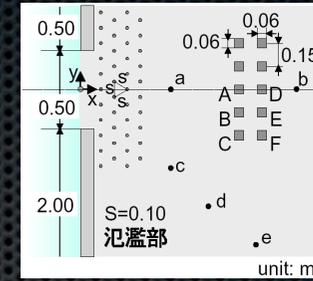
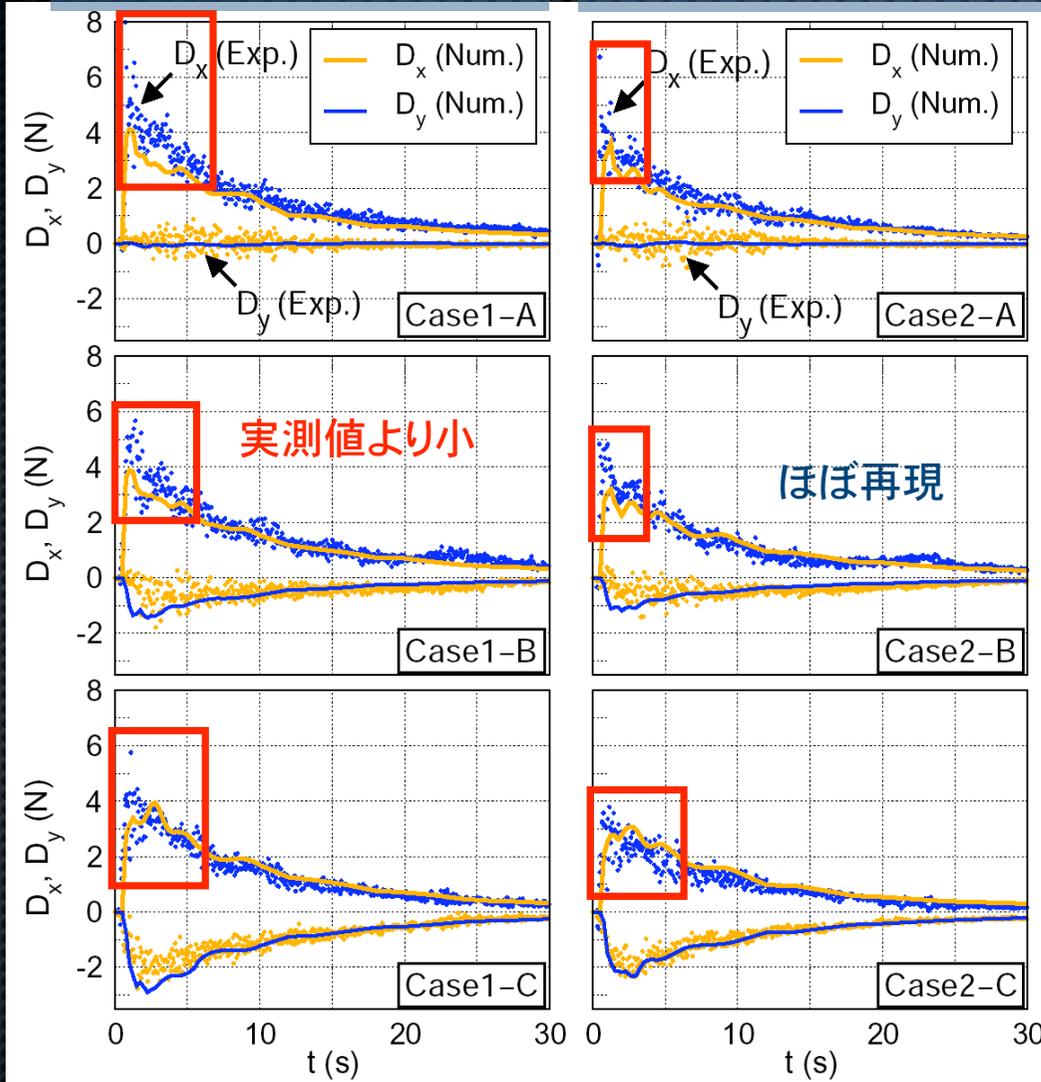
水害防備林有り(Case2)



②家屋群・樹林帯の取り扱い ～流体力～

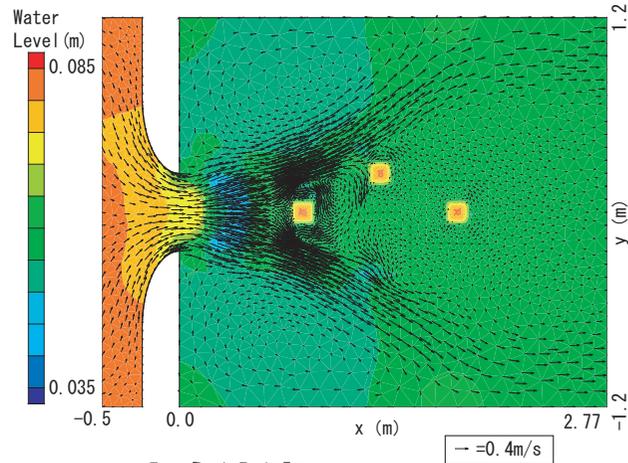
水害防備林無し(Case1)

水害防備林有り(Case2)

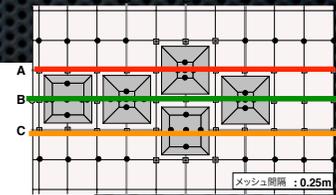
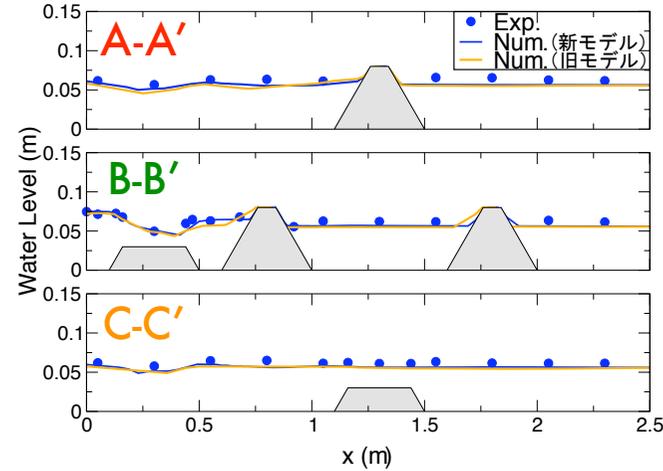


③ 水没・非水没状態となる地形起伏の取り扱い

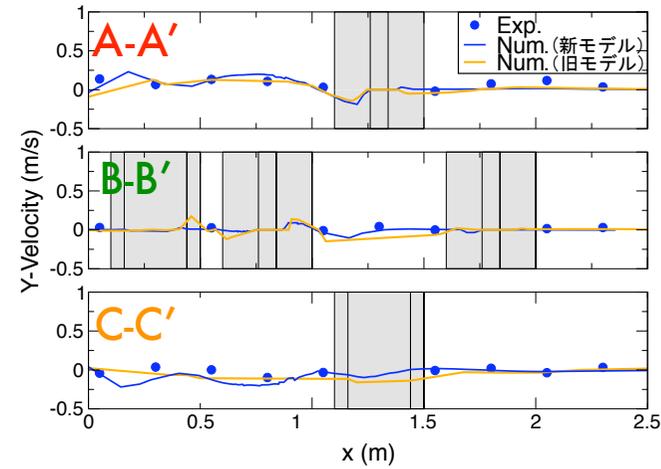
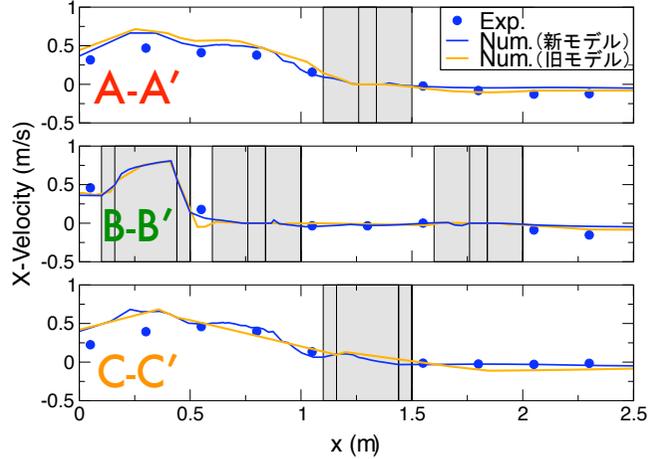
• 水面形状と流速ベクトル



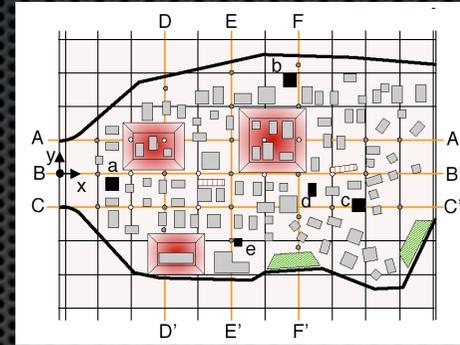
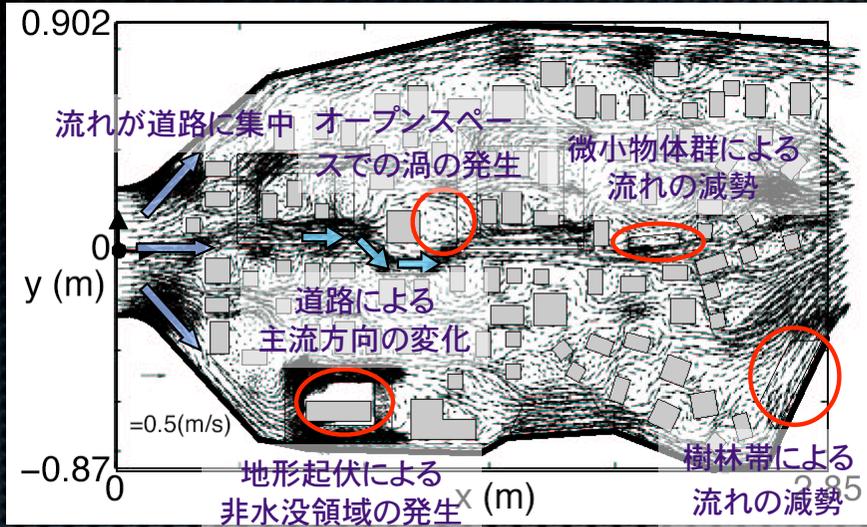
• 水位



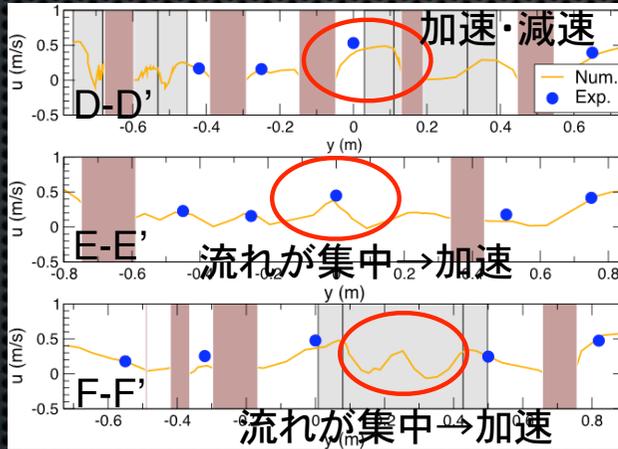
• x, y方向流速



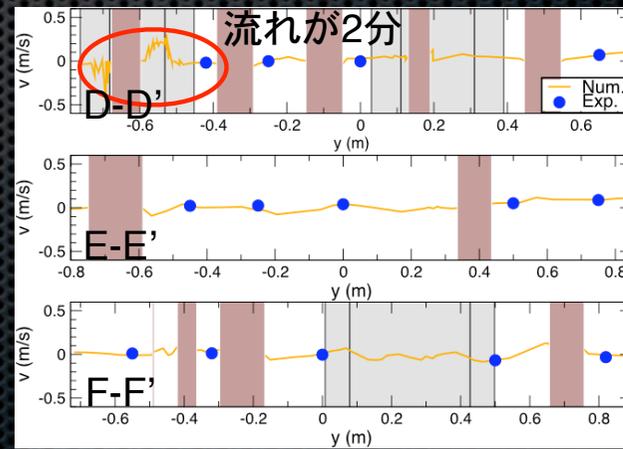
④複雑な構造を有する市街地での氾濫流 ～流速ベクトル～



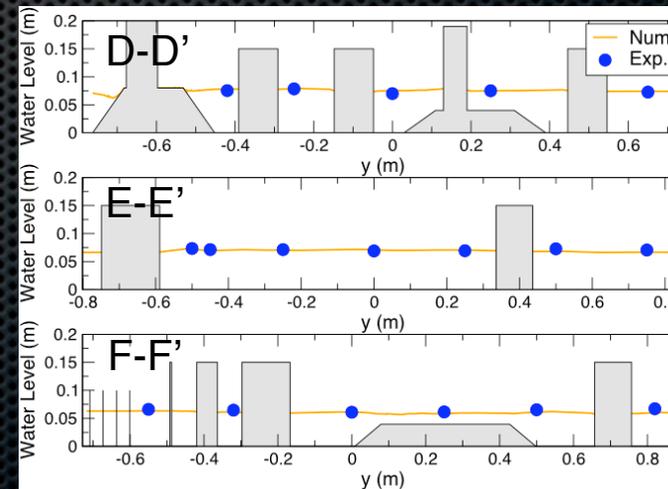
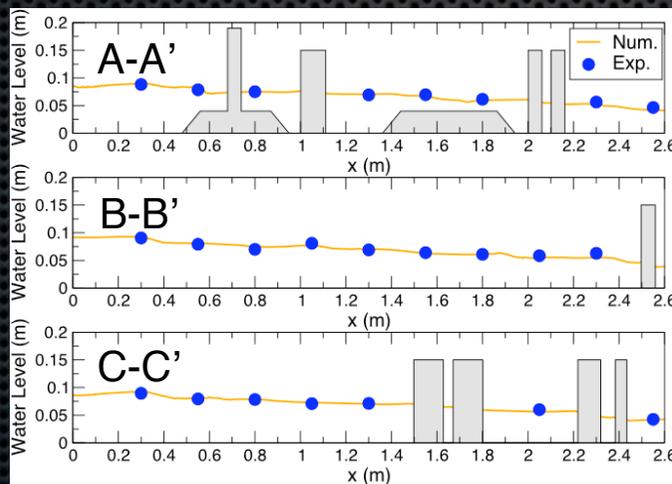
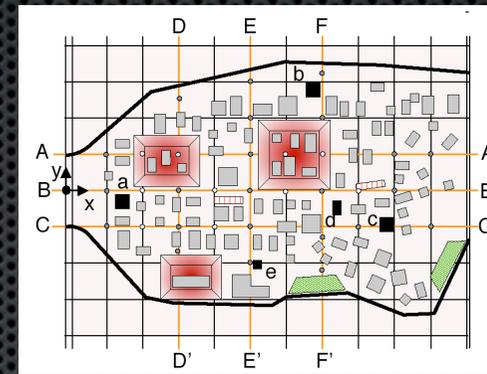
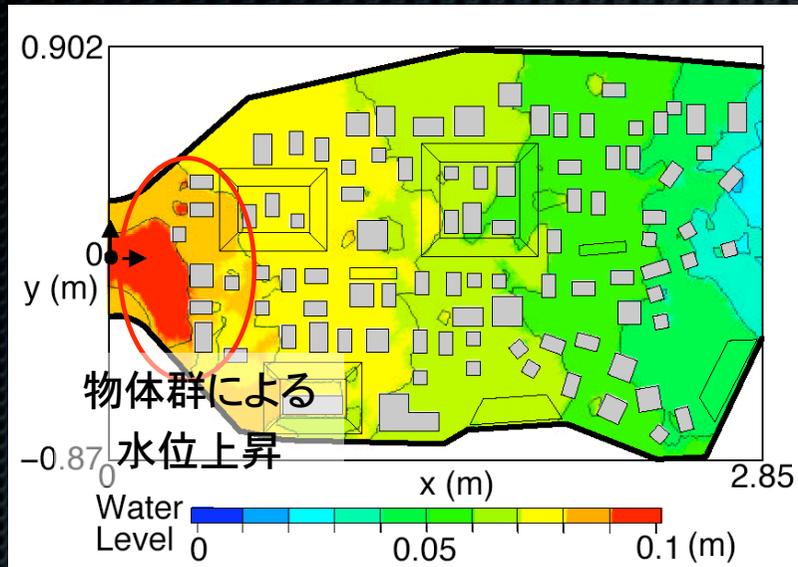
x方向流速 u



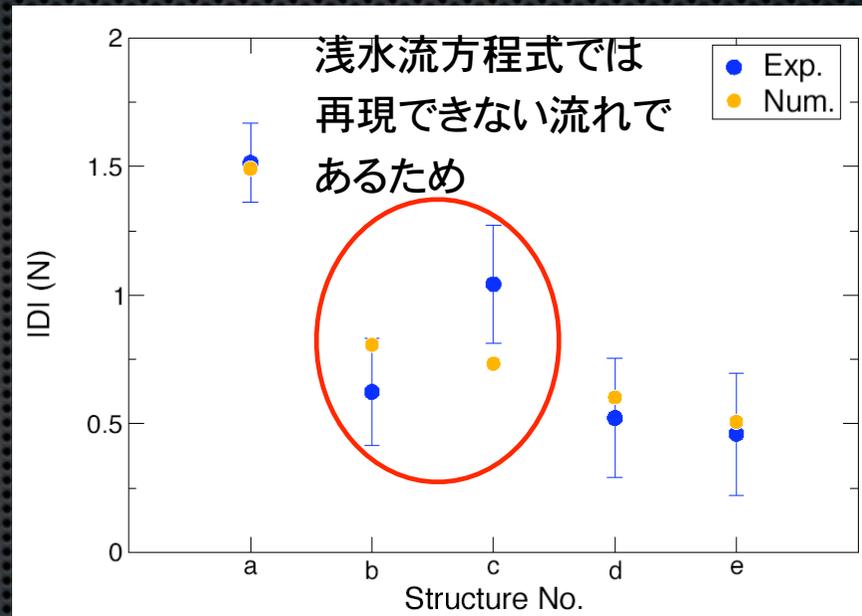
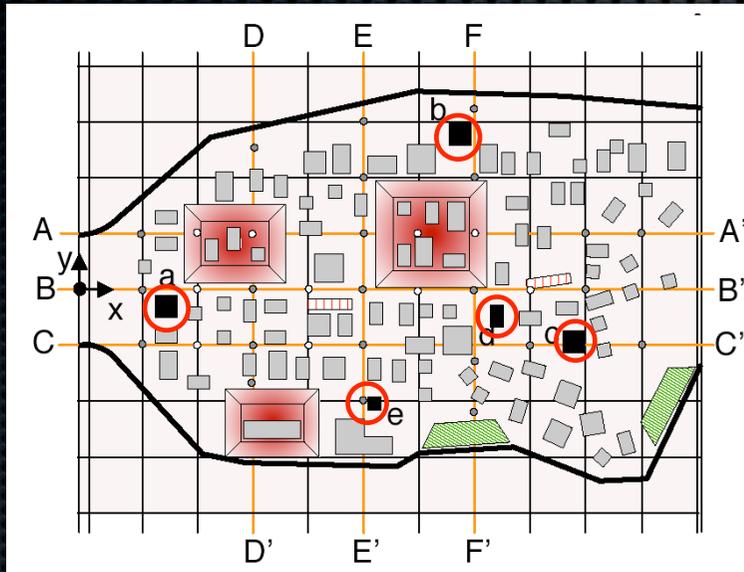
y方向流速 v



④複雑な構造を有する市街地での氾濫流 ~水位~

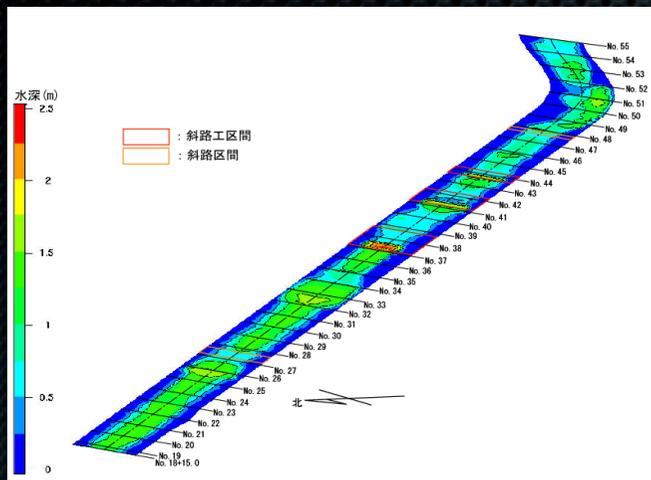


④複雑な構造を有する市街地での氾濫流 ～流体力～

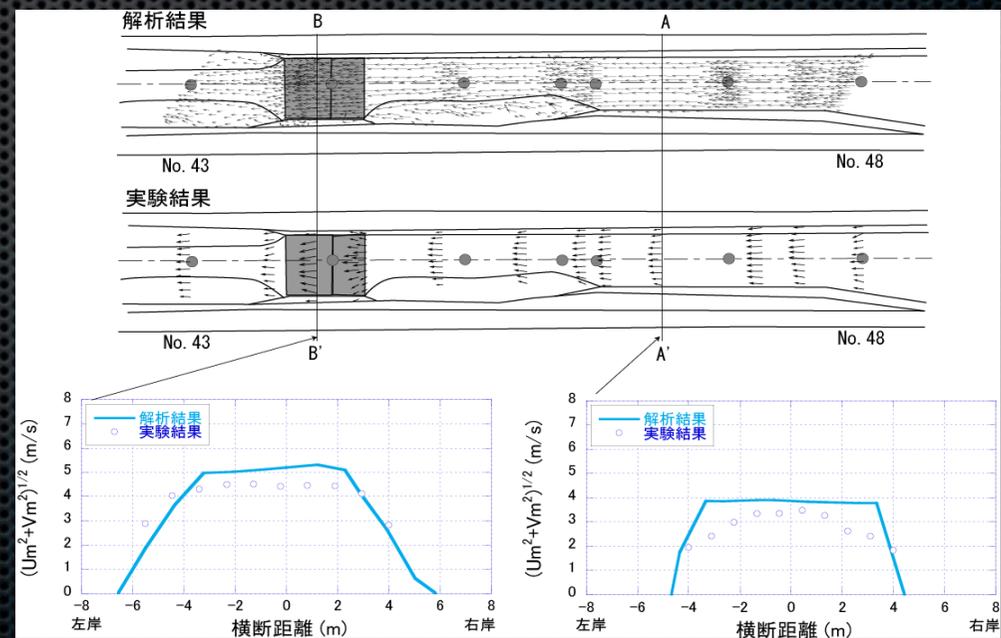
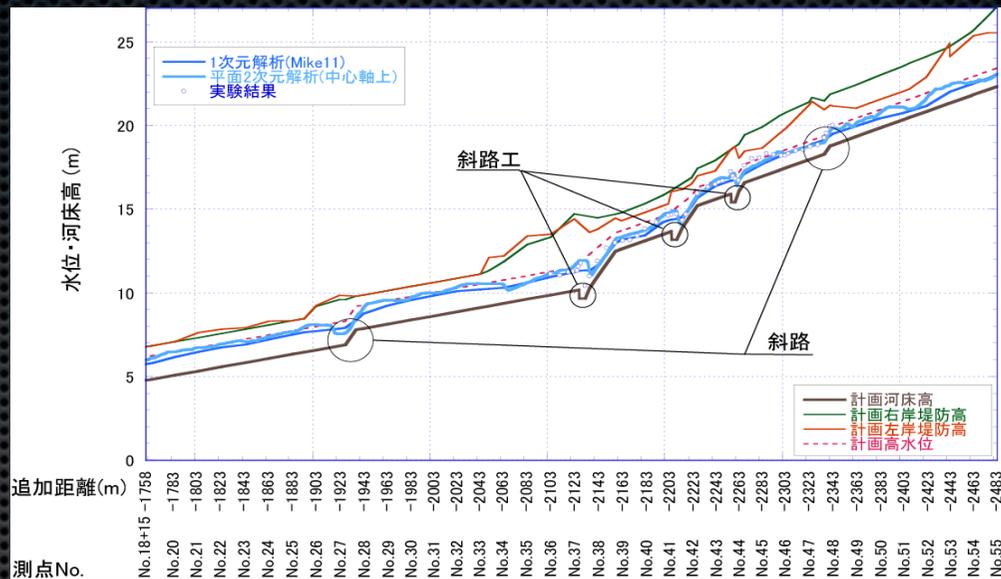
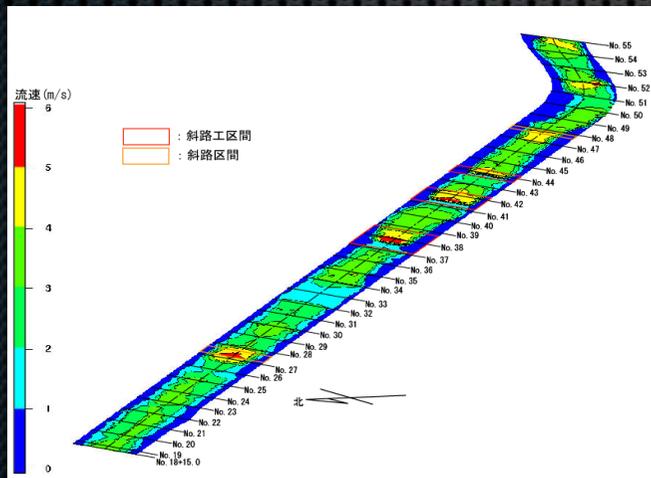


氾濫解析モデルの検証 ~河道~

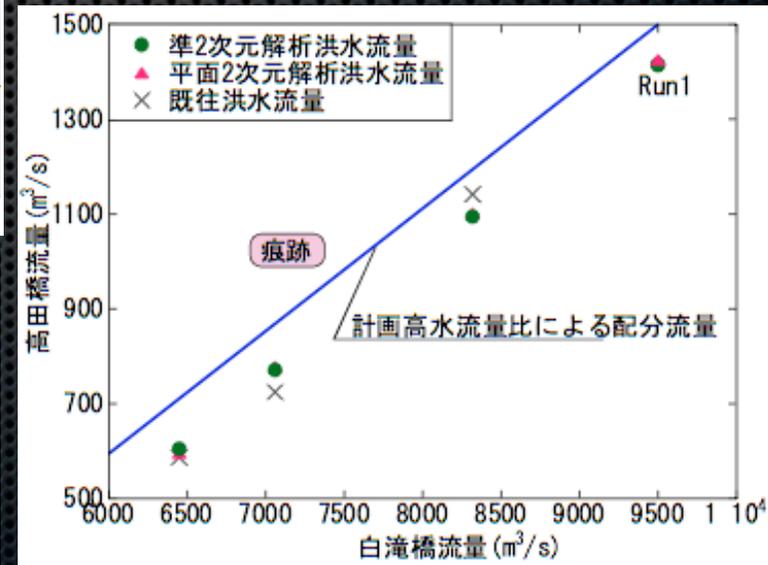
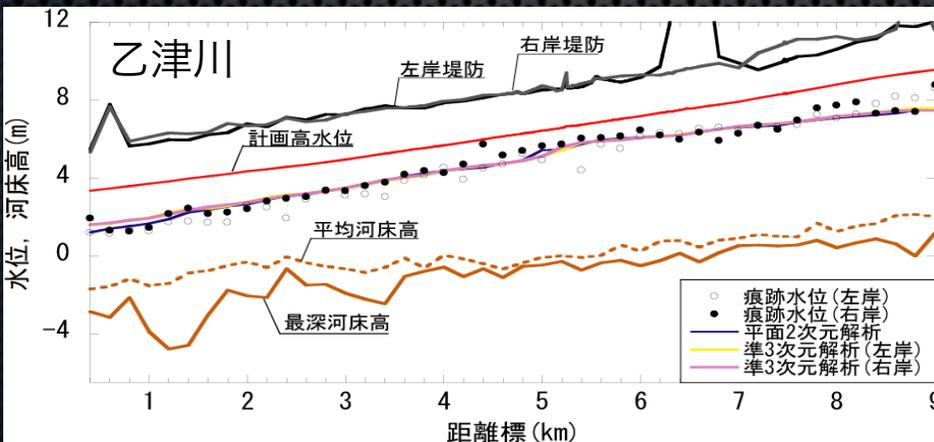
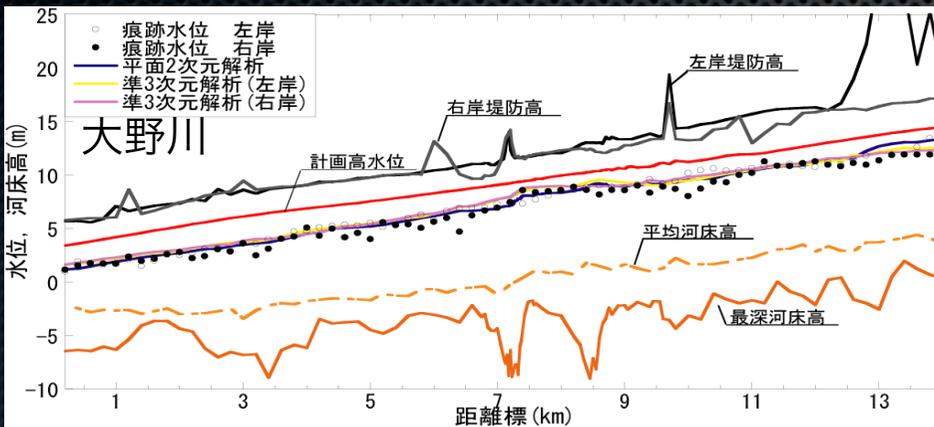
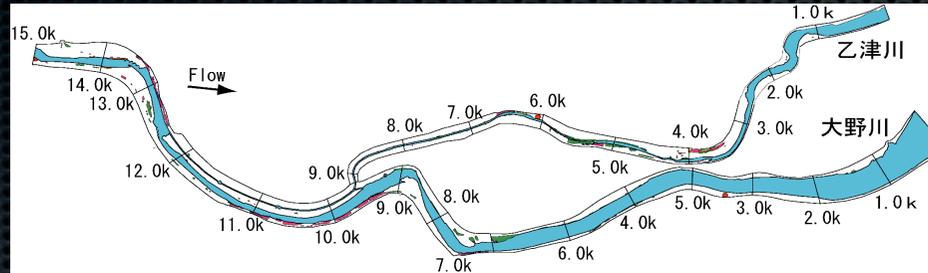
水位



流速ベクトル

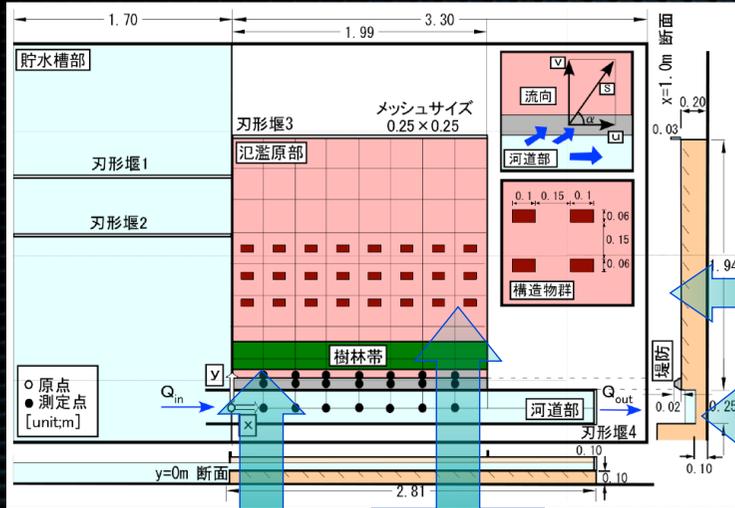


包括型氾濫解析モデルの検証 ~河道~



包括型氾濫解析モデルの検証

～河道と氾濫原との水のやり取り～



完全越流
or
潜り越流

築堤
or
掘り込み

堤内樹林帯
有 or 無

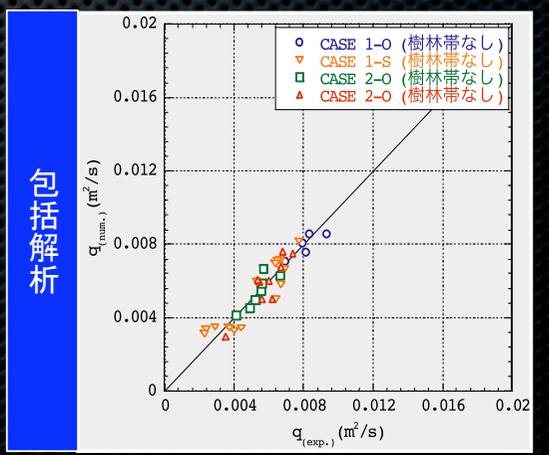
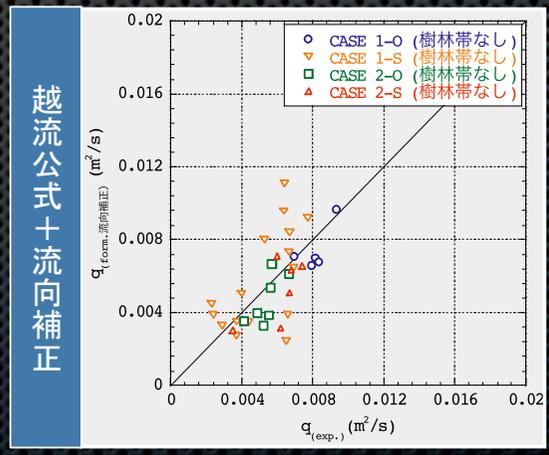
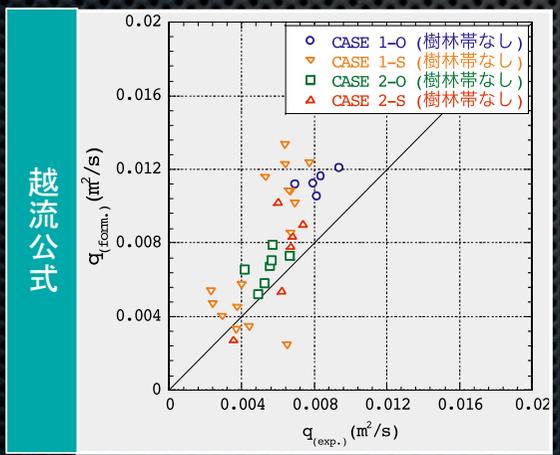
堤内構造物群
有 or 無

本間公式では、単位幅当たりの越流氾濫流量 q_0 (m^2/s)は次式で与えられる。

完全越流：
 $h_2/h_1 < 2/3$ では、 $q_0 = C_1 h_1 \sqrt{2gh_1}$

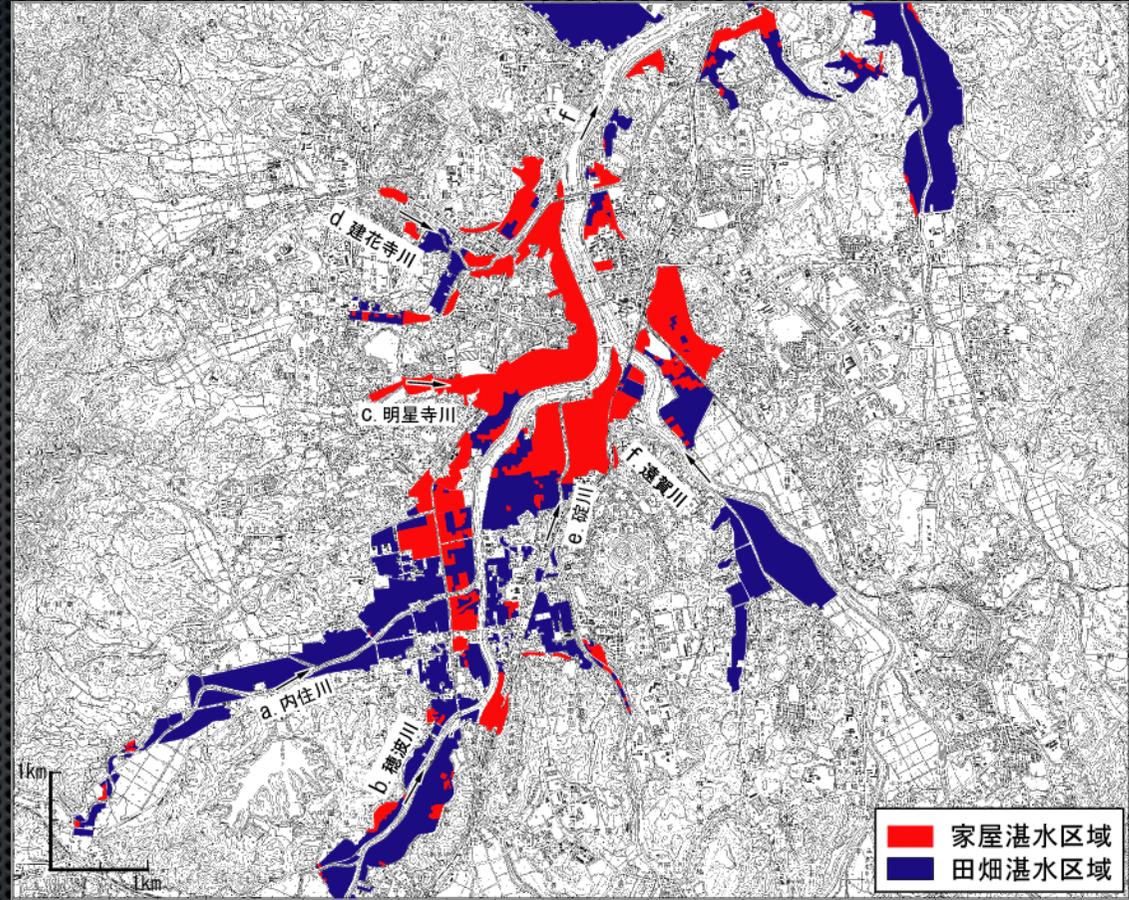
潜り越流：
 $h_2/h_1 \geq 2/3$ では、 $q_0 = C_2 h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$

流量係数
 $C_1=0.35, C_2=0.91$



モデルの適用例

① 飯塚市を中心とした遠賀川流域の内水氾濫



モデルの適用例 ① 飯塚市を中心とした遠賀川流域の内水氾濫：解析条件

○対象領域

- ・ 飯塚市
- ・ 河川(遠賀川・穂波川・建花寺川・碓川・明星寺川)

○解析用データ

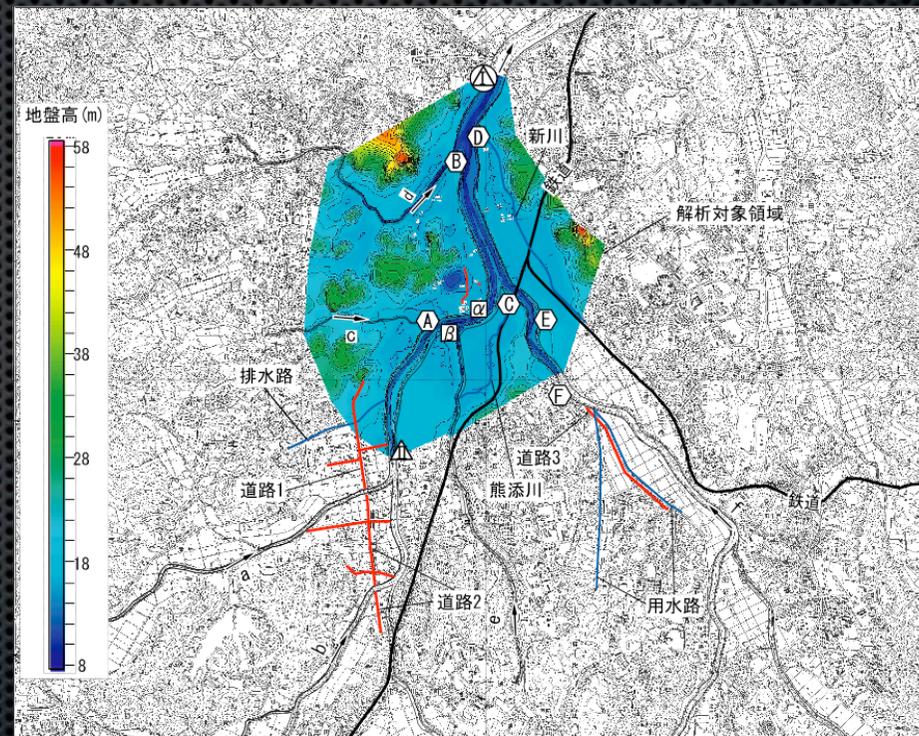
- ・ 氾濫原要素の線形(河道・道路・堤防etc)
平面地図(1/2500)から座標を抽出

- ・ 氾濫原の地盤高
10m格子の数値地図

- ・ 河道・堤防
 - ・ 横断面図(遠賀川・穂波川・明星寺川)
 - ・ 一定深さ掘り下げ(建花寺川・碓川)

- ・ 粗度係数
 - ・ 飯塚市基本図の地図記号

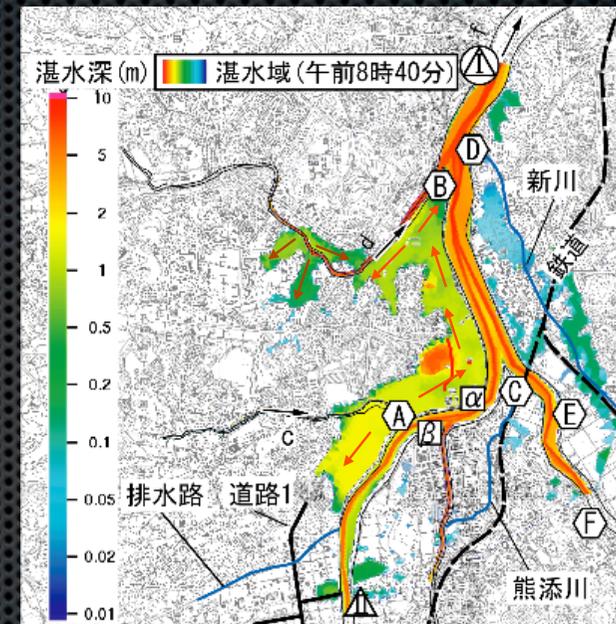
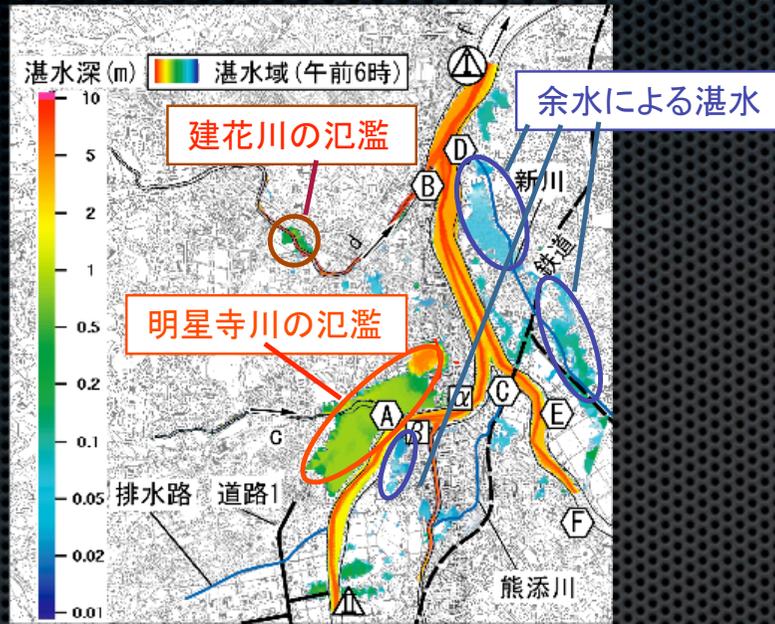
- ・ 河道の境界条件
 - ・ 水位の時間変化
 - 遠賀川上流: 鶴三緒排水機場
 - 遠賀川下流: 川島水位観測所
 - ・ 流量ハイドログラフ
 - 穂波川上流: 秋松橋水位観測所
 - ・ 仮想的なハイドログラフ
 - 建花寺川・明星寺川・碓川



モデルの適用例

① 飯塚市を中心とした遠賀川流域の内水氾濫：解析結果

湛水深



流速ベクトル



河道特性を考慮
→ 溢水箇所の
特定可能



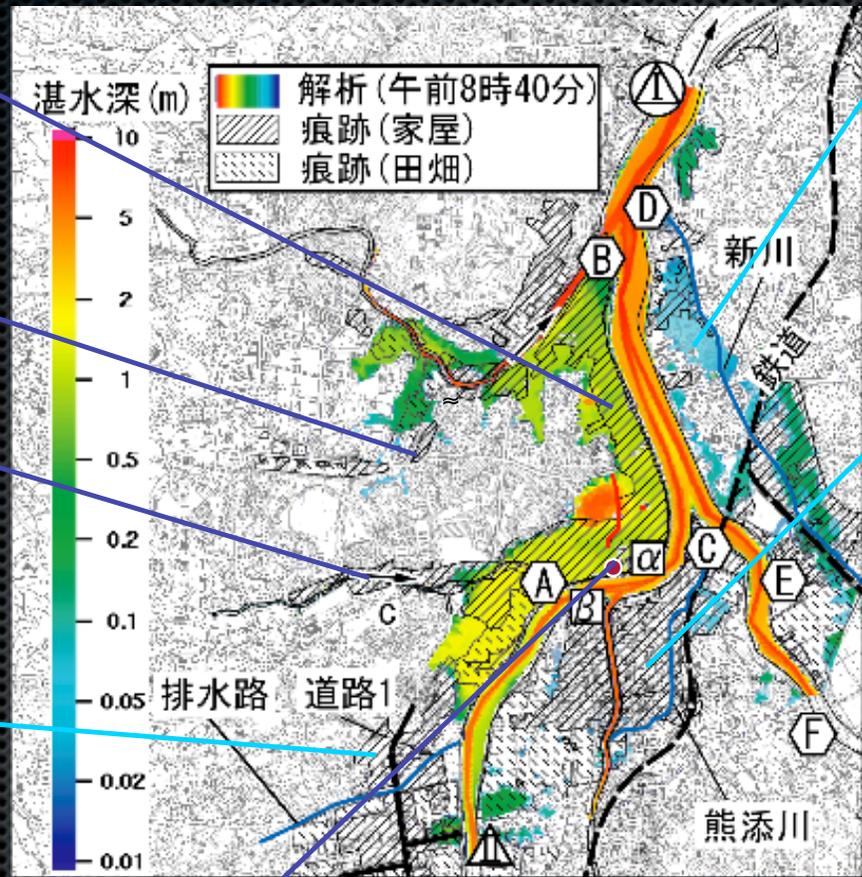
モデルの適用例

① 飯塚市を中心とした遠賀川流域の内水氾濫：湛水深との比較

痕跡湛水区域
 \approx
 解析湛水区域

痕跡湛水区域
 \approx
 解析湛水区域
 地盤高データの解像度不足のため

痕跡湛水区域
 \neq
 解析湛水区域
 用排水路網を考慮していないため

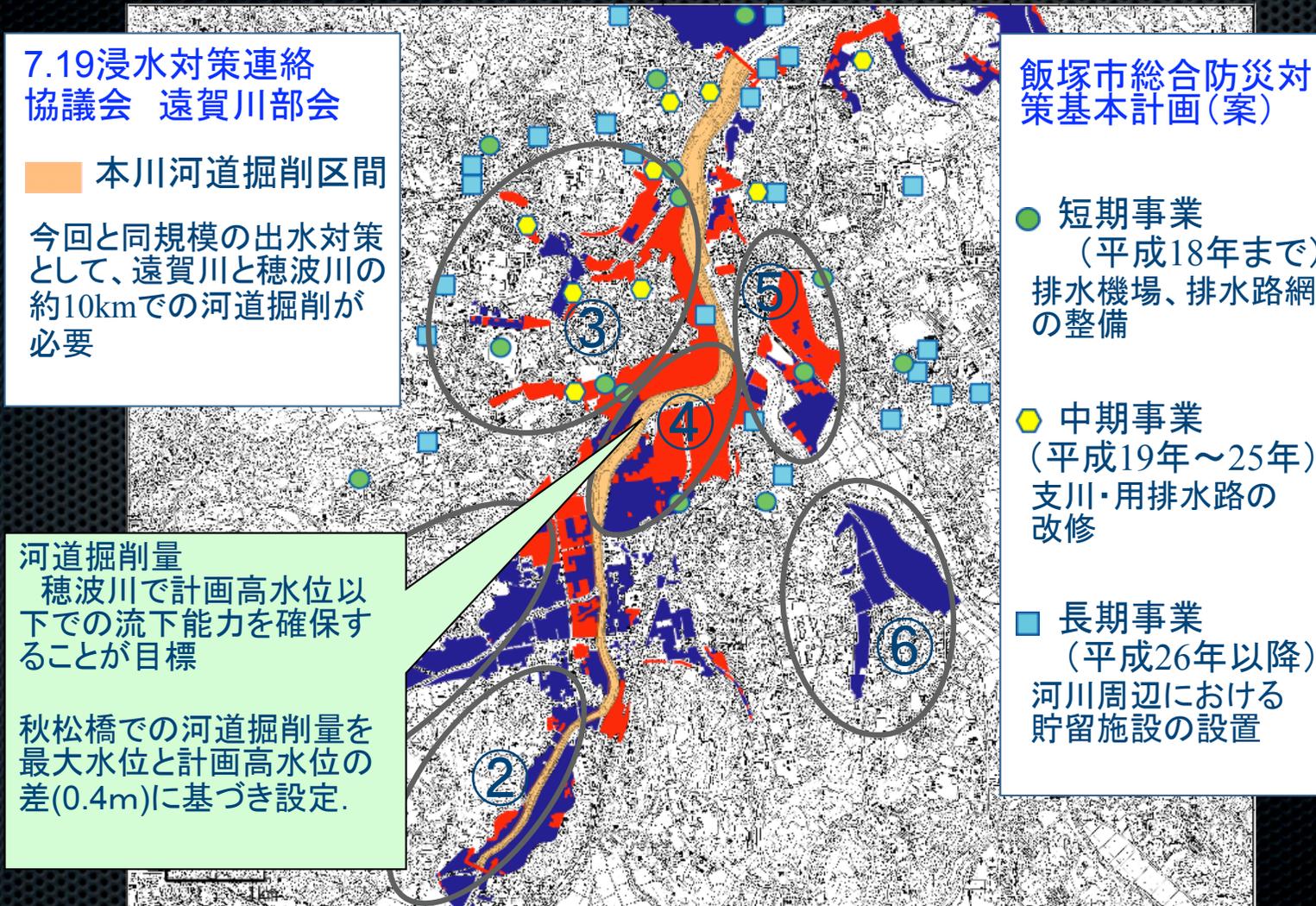


痕跡湛水区域
 \neq
 解析湛水区域
 新川、用排水路網を考慮していないため

痕跡湛水区域
 \neq
 解析湛水区域
 熊添川、用排水路網を考慮していないため

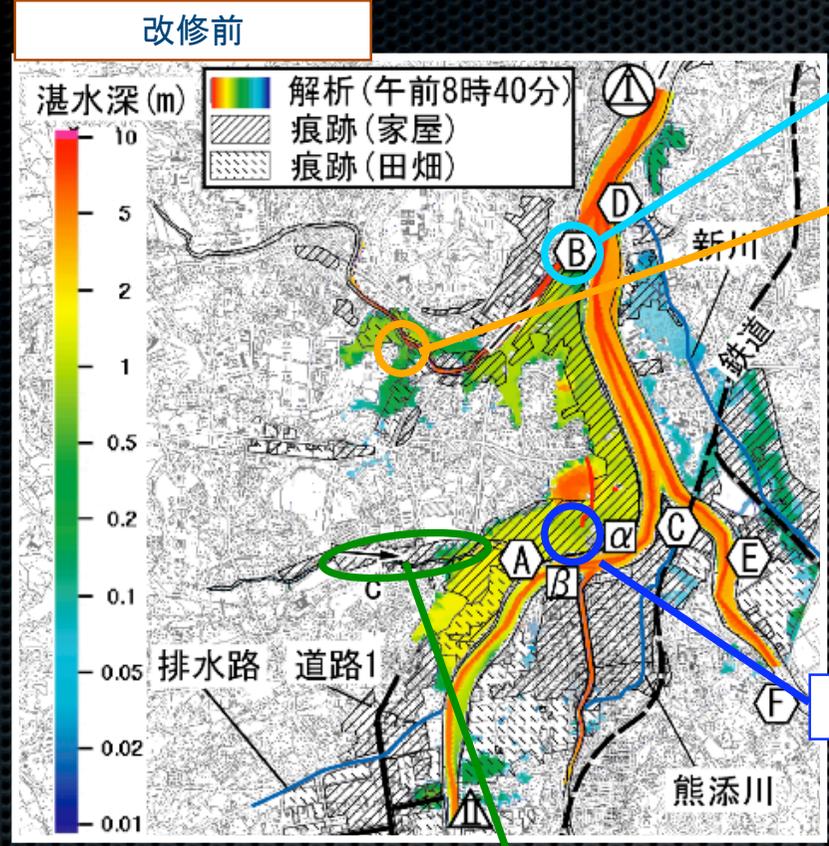
湛水深：約1.0m (午前7時10分)
 解析 \approx 実測

モデルの適用例 ① 飯塚市を中心とした遠賀川流域の内水氾濫：本川の改修効果



モデルの適用例

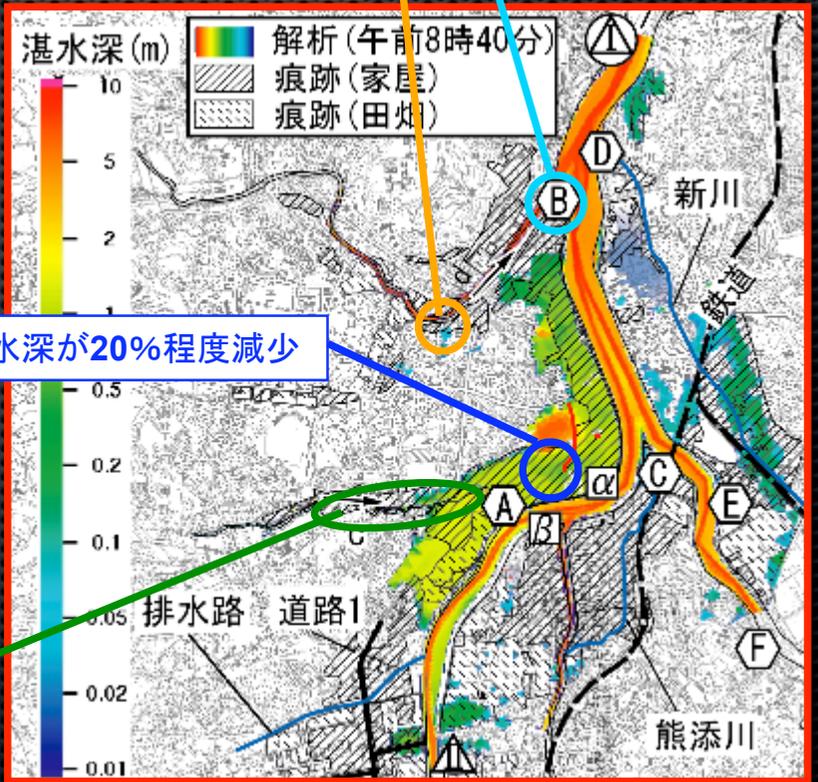
① 飯塚市を中心とした遠賀川流域の内水氾濫：解析結果 -水位



氾濫水は、片島排水機場付近まで到達しない。

溢水氾濫の発生なし

改修後



湛水深が20%程度減少

湛水深が20%程度減少

モデルの適用例

① 飯塚市を中心とした遠賀川流域の内水氾濫： 解析結果-流速



氾濫水は、片島排水機場付近まで到達しない。



溢水氾濫の発生なし

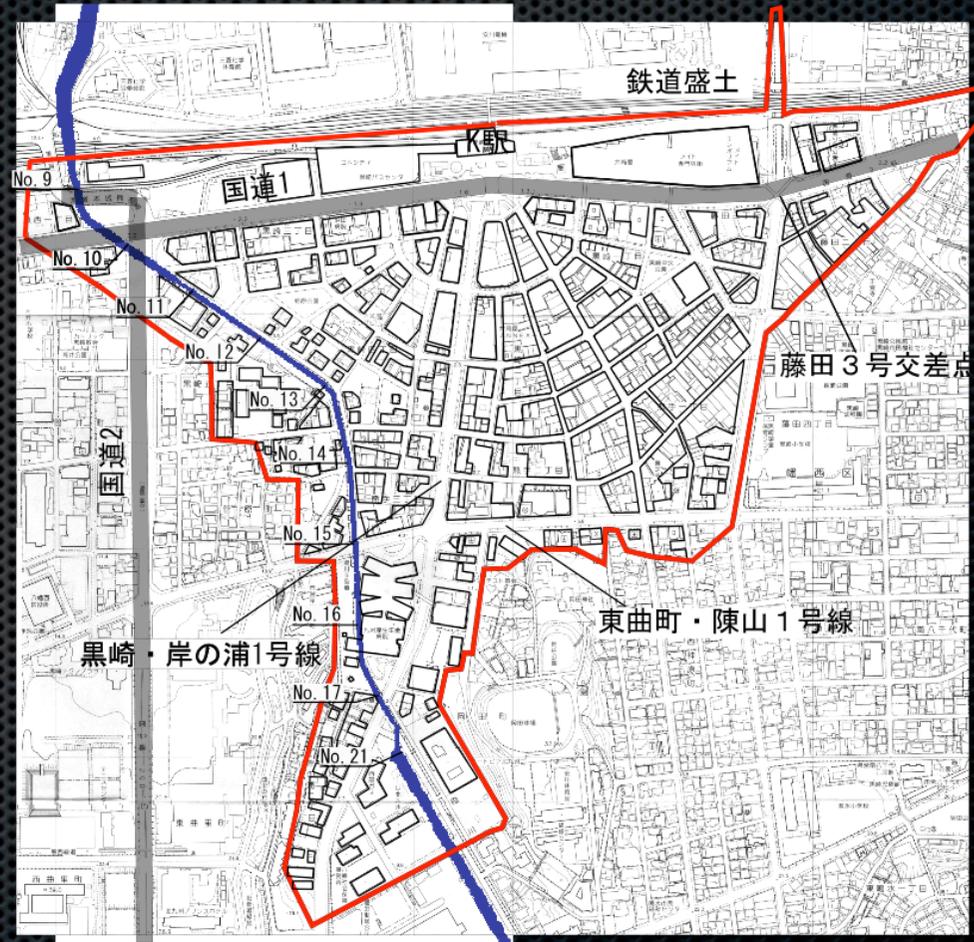
モデルの適用例 ② 中小河川の氾濫

■ 解析対象区域の概要

- K市の副都心のK地区
- 駅を中心に扇状に広がる市街地
- 中心部に向かって緩やかに傾斜する地形
- 鉄道盛土によって中心部が分断
- 鉄道に沿って主要幹線道路である国道

■ 解析対象河川

- K地区中心部を貫流する急流中小河川
- 延長：4,165km, 流域面積：3.6km²
- 河床勾配：1/60~1/40の急流部



モデルの適用例 ② 中小河川の氾濫：解析条件

K地区での浸水，湛水，排水プロセスの要因

A川の特徴と当該市街地等の特性より

- ・A川からの氾濫
- ・A川と雨水排水システムの排水能力
- ・降雨による表層流

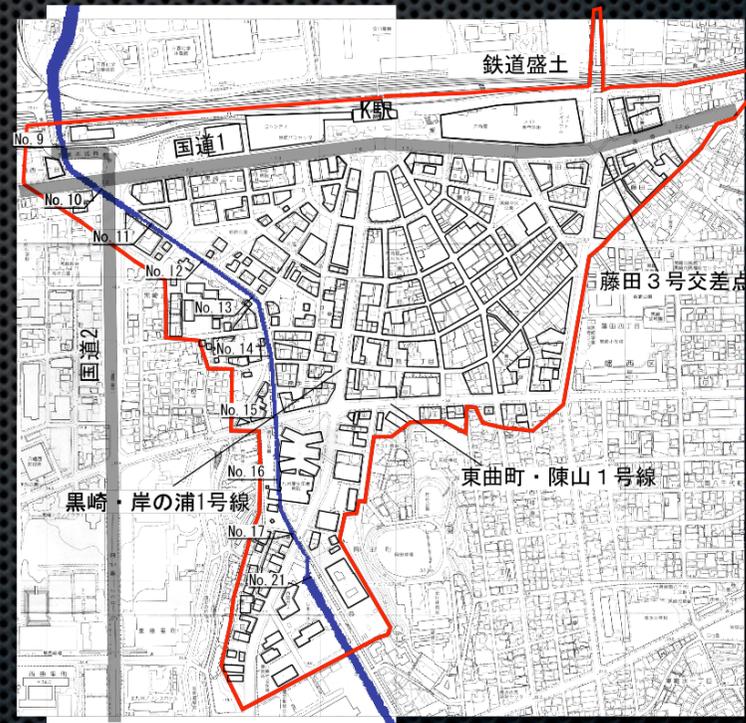
解析条件

計画高水に対する現況河道を対象として

Run1: A川からの氾濫

Run2: A川からの氾濫 + 雨水排水システム

Run3: A川からの氾濫 + 雨水排水システム
+ 降雨による表層流



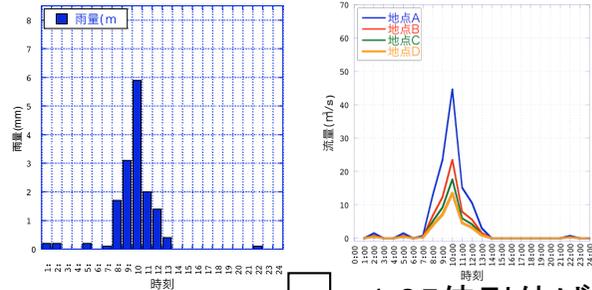
モデルの適用例 ② 中小河川の氾濫：解析条件

流出解析

- ・A川の流域面積50km²未満
- ・流量観測値がない
- ・上流に洪水調節施設がない

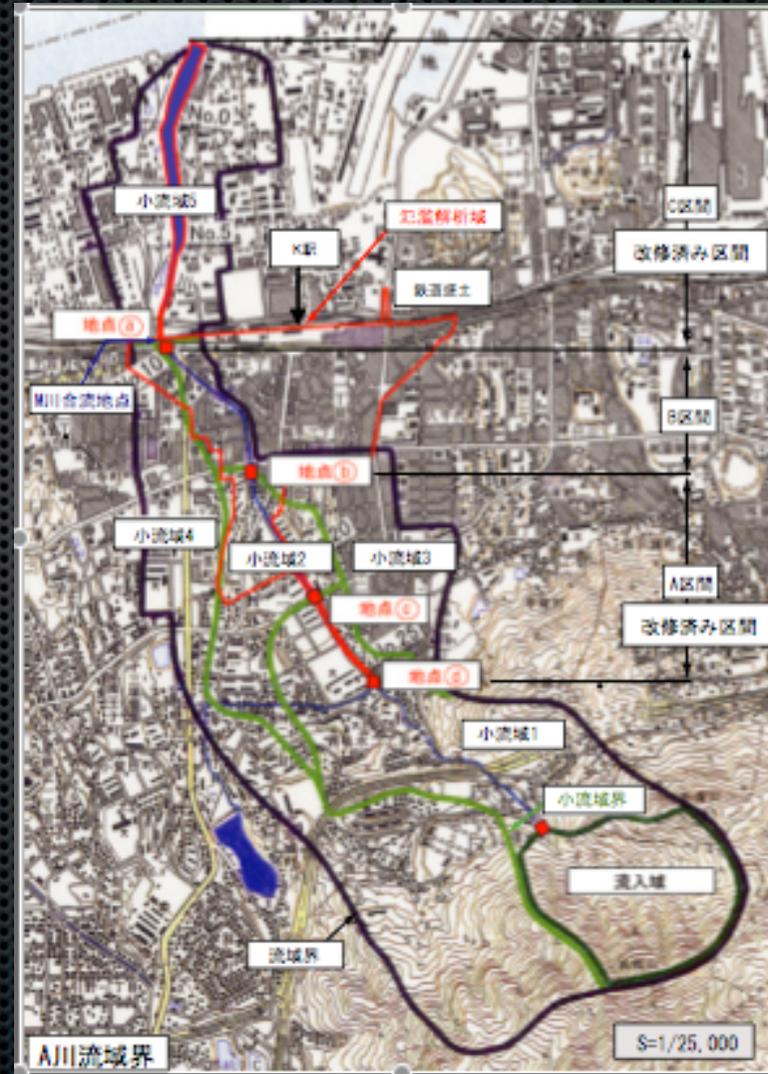
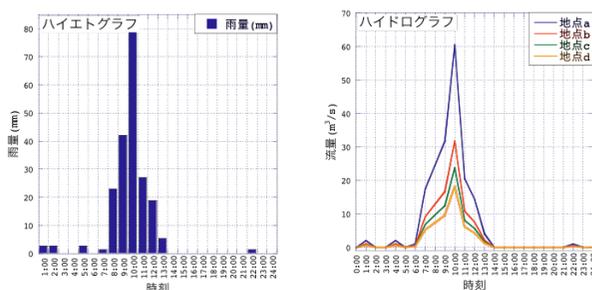
合成合理式

実績降雨



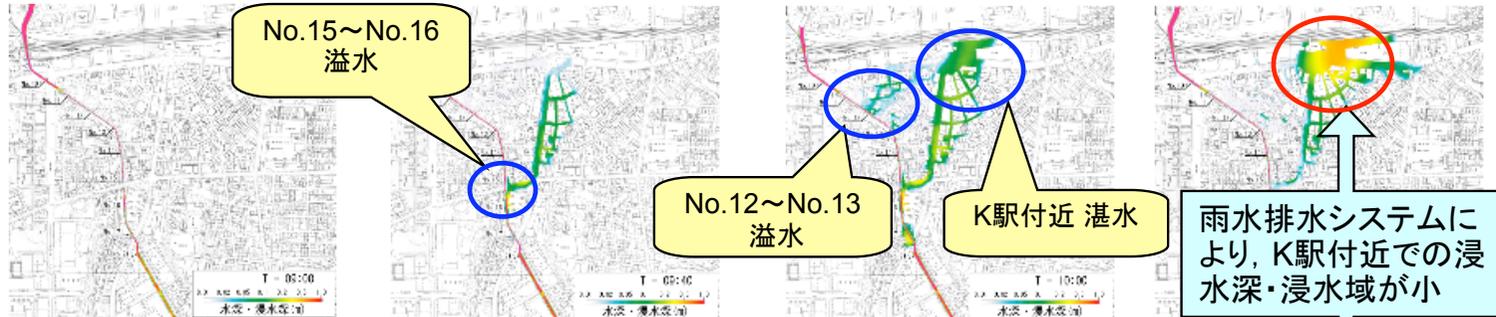
1.35倍引伸ばし

計画降雨



モデルの適用例 ② 中小河川の氾濫：解析結果

Run1: A川からの氾濫



Run2: A川からの氾濫+雨水排水システム



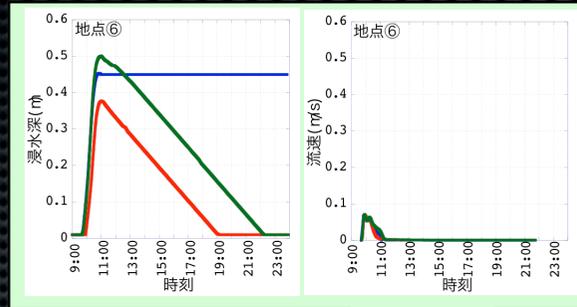
Run3: A川からの氾濫+雨水排水システム+降雨による表層流



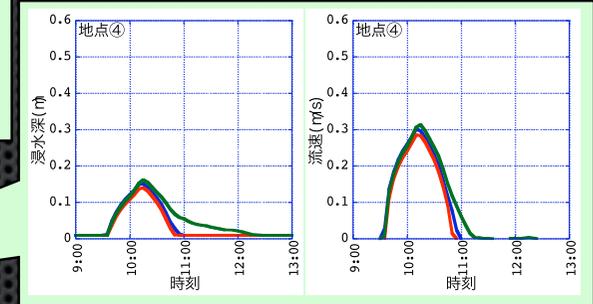
モデルの適用例

② 中小河川の氾濫：解析結果

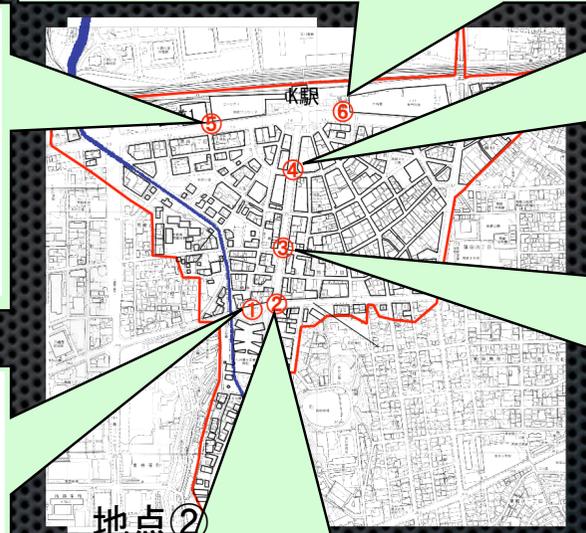
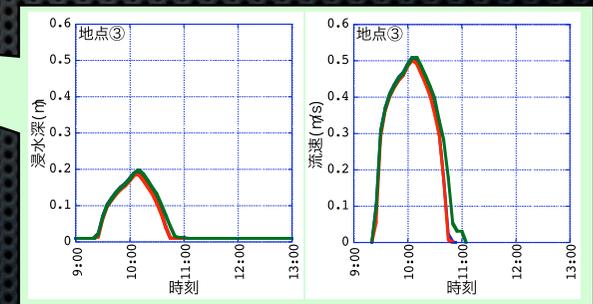
- **Run1**: 河道からの氾濫
- **Run2**: 河道からの氾濫+雨水排水システム
- **Run3**: 河道からの氾濫+雨水排水システム+降雨による表層流



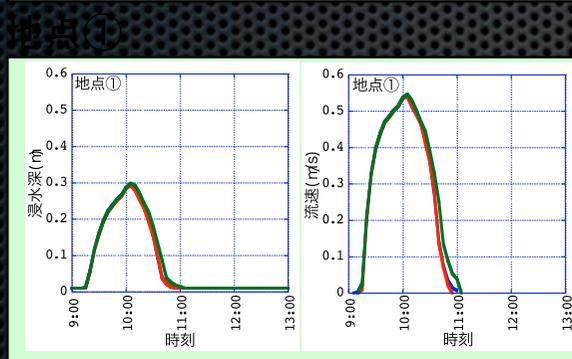
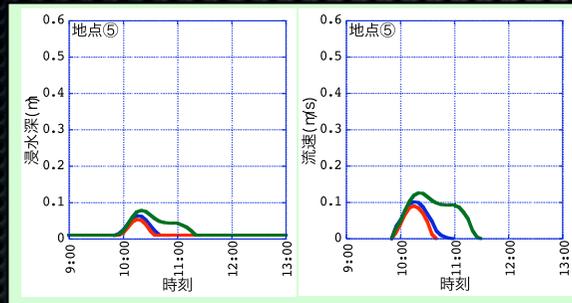
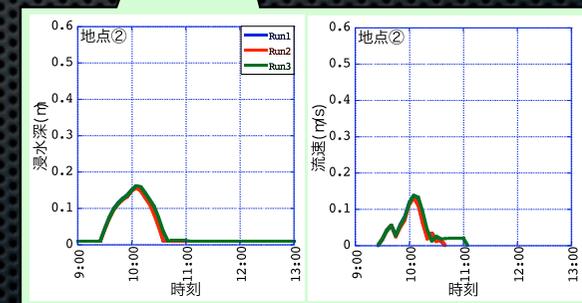
地点④



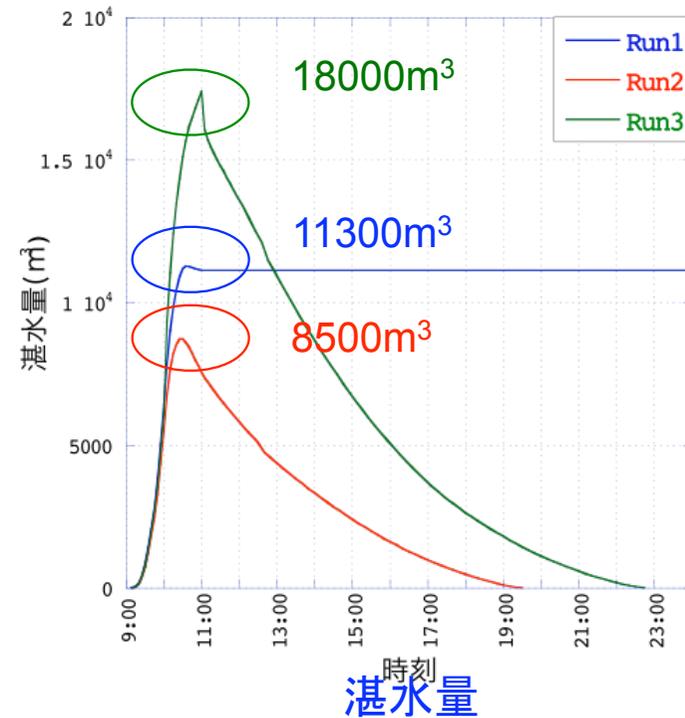
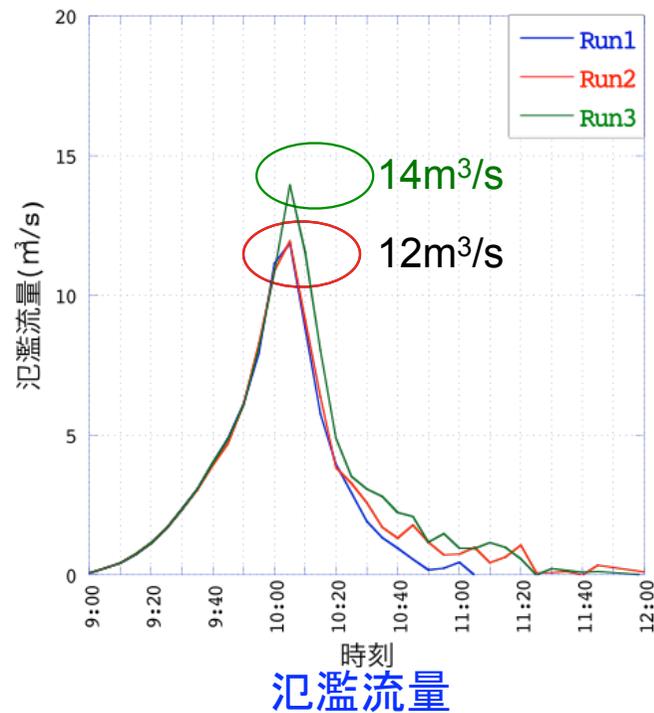
地点③



地点②



モデルの適用例 ② 中小河川の氾濫：氾濫流量



- ・Run1とRun2の氾濫流量は、同程度である。
- ・Run3の氾濫流量は、表層流の流量が加わるため Run2の1.2倍程度となる。

- ・雨水排水システムにより3,000m³程度の氾濫水が排水されたと予測される。
- ・Run3の湛水量に占める余水の量は10,000m³程度と予測される。

モデルの適用例 ② 中小河川の氾濫：まとめ

計画高水に対する現況河道を対象として

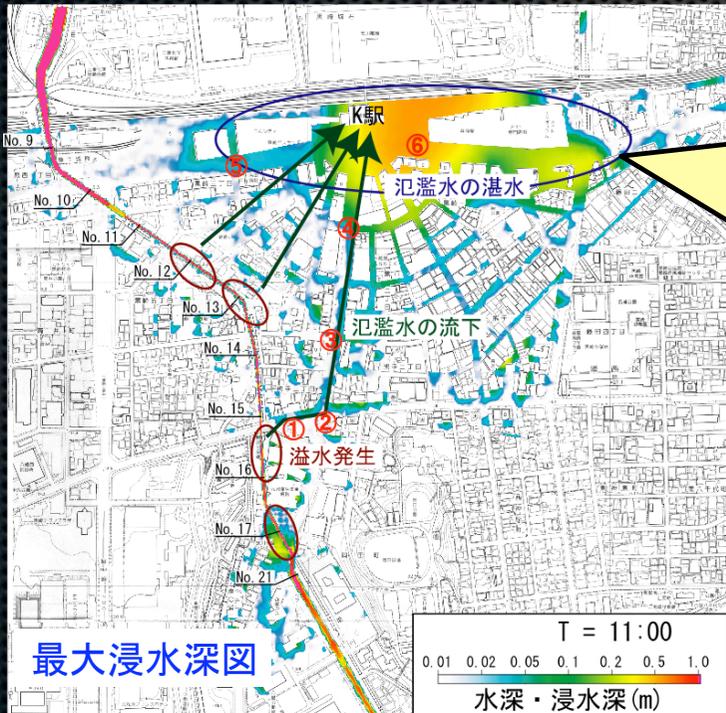
Run1: A川からの氾濫

Run2: A川からの氾濫＋雨水排水システム

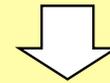
Run3: A川からの氾濫＋雨水排水システム
＋降雨による表層流



表層流が及ぼす影響



計画規模での現況河道からの氾濫水と余水は、K駅周辺に湛水し、主要幹線道路が通行困難となる。



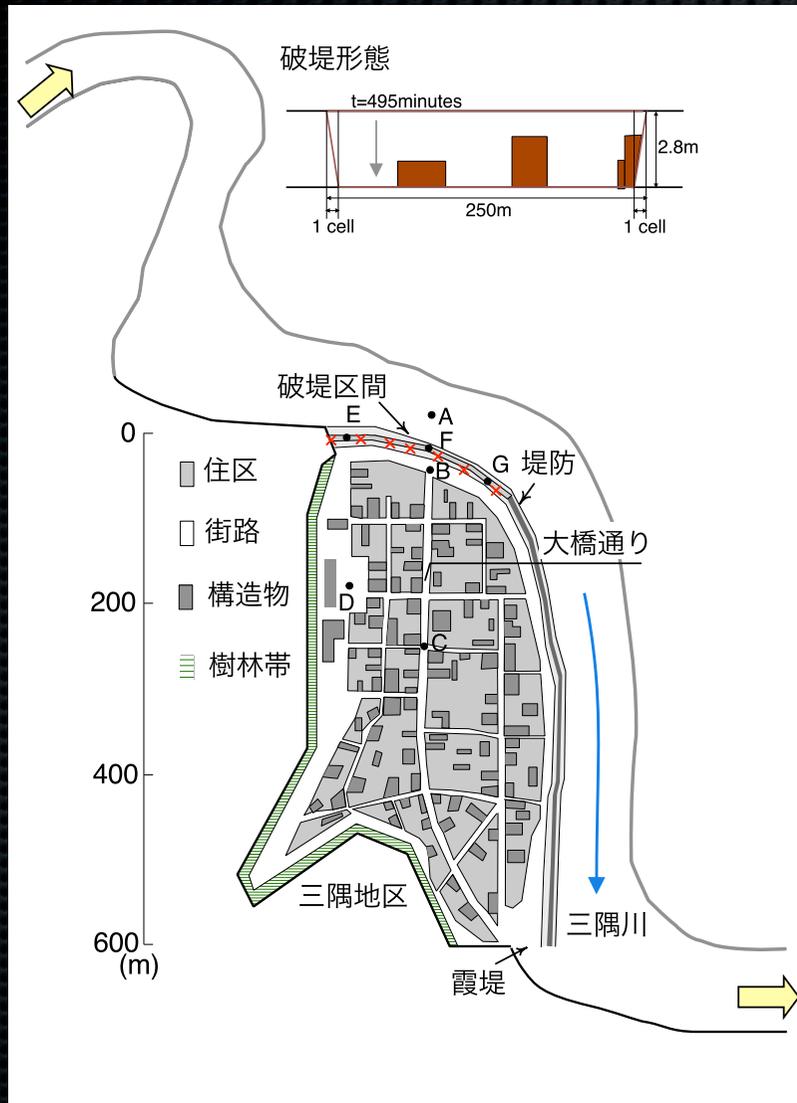
ハード面

- ・河道改修
- ・排水能力の向上

ソフト面

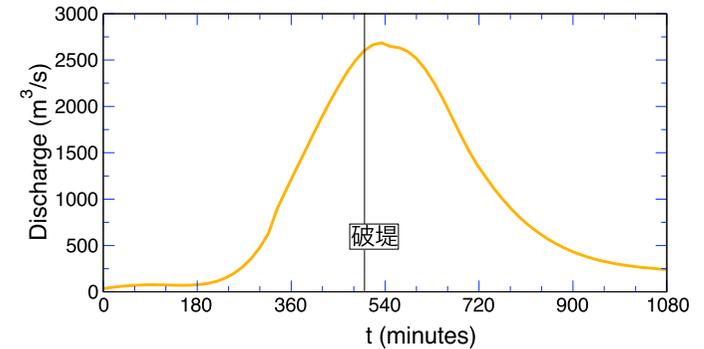
- ・鉄道利用者に向けた対策
- ・交通規制や迂回路等の検討

モデルの適用例 ③ 破堤氾濫：1986年の破堤氾濫（三隅地区）



- Case1：越流氾濫
- Case2：破堤氾濫（漸次破堤）
- Case3：破堤氾濫（瞬間破堤）

流量ハイドログラフ

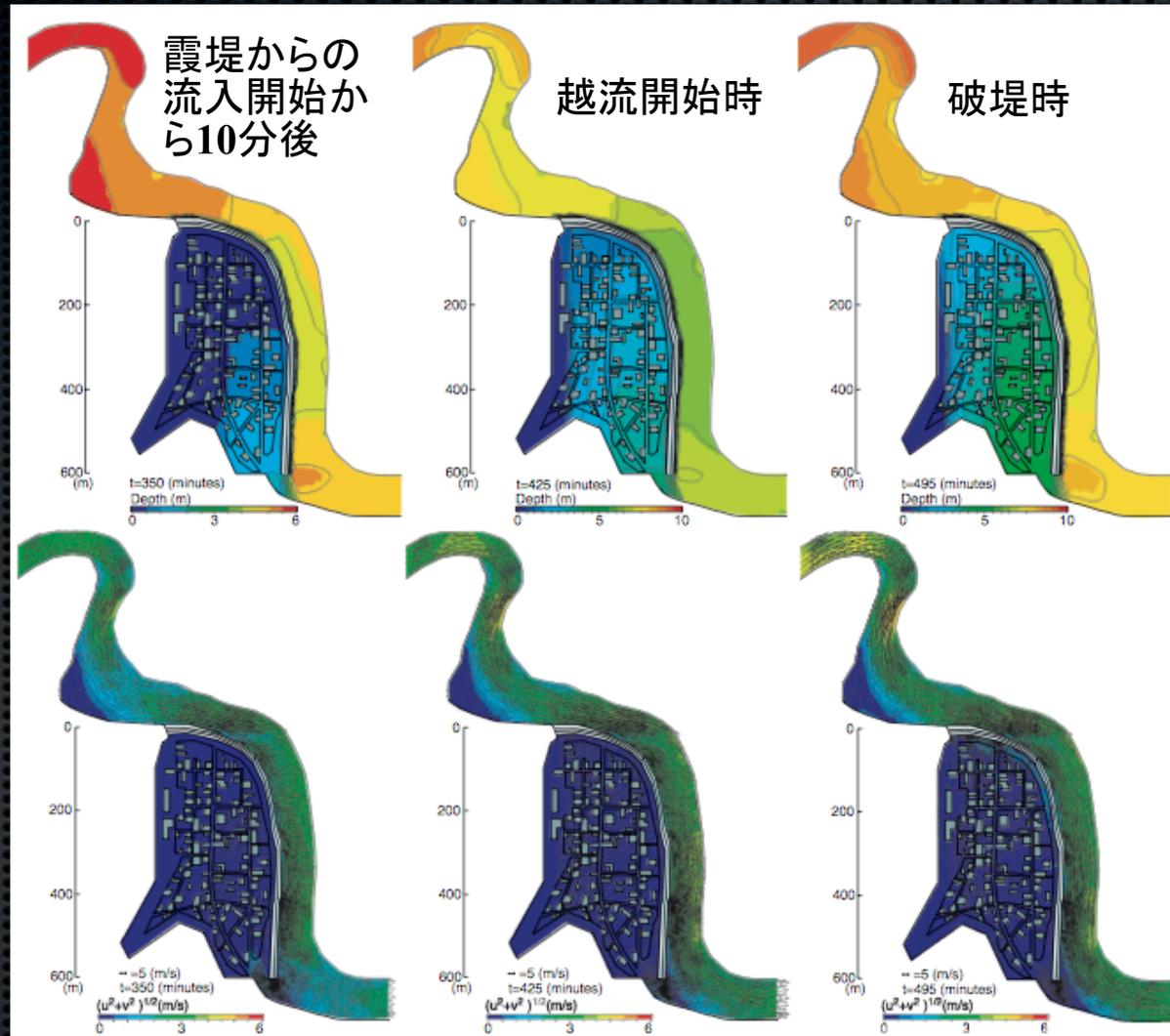


適用場所	条件
構造物の境界	閉境界条件
三隅川の流入条件	流量ハイドログラフ
三隅川の下流端	自由流出条件
三隅川左岸・右岸上流	本間の越流公式

モデルの適用例 ③ 破堤氾濫：解析結果

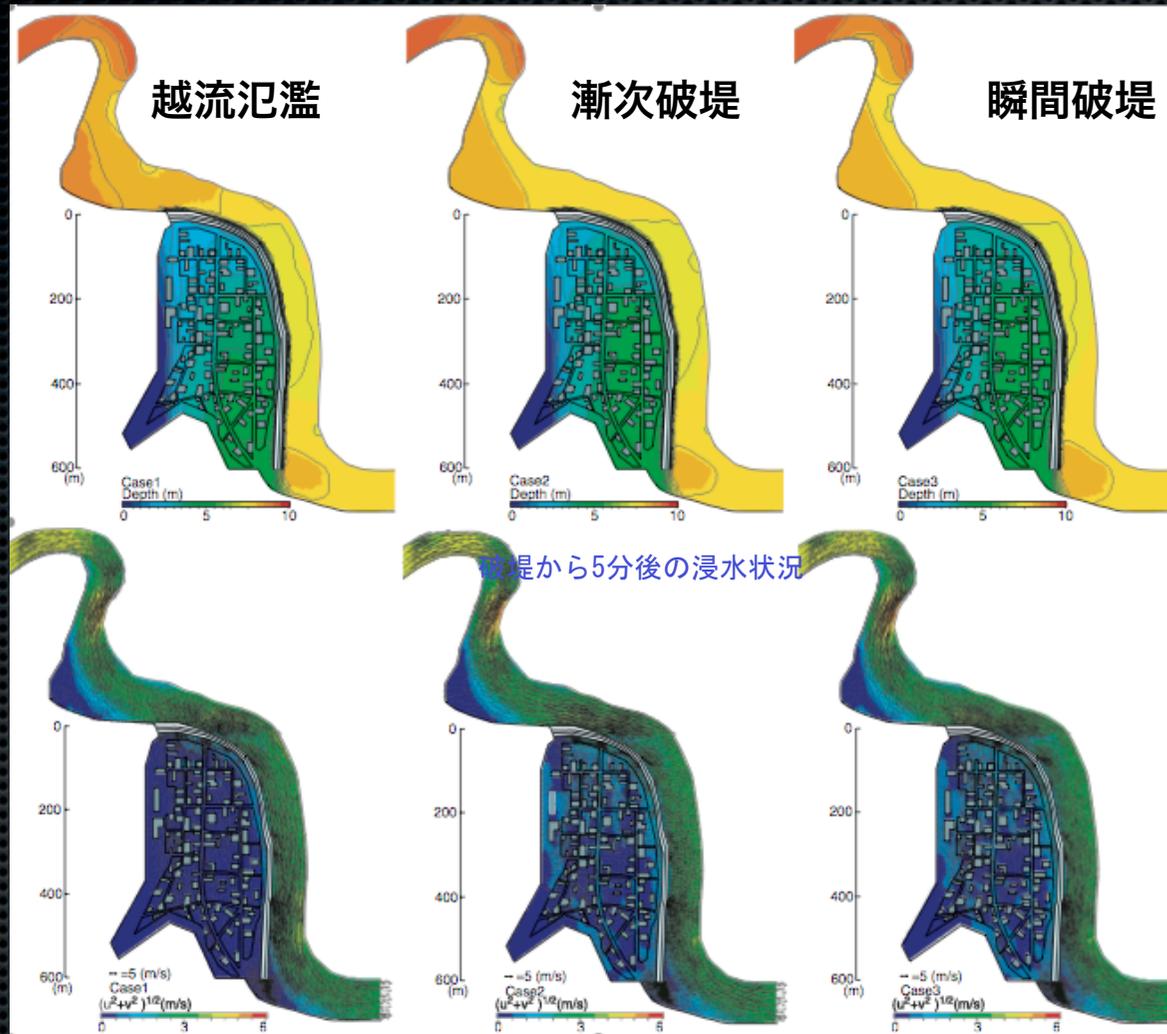
浸水深

流速ベクトル



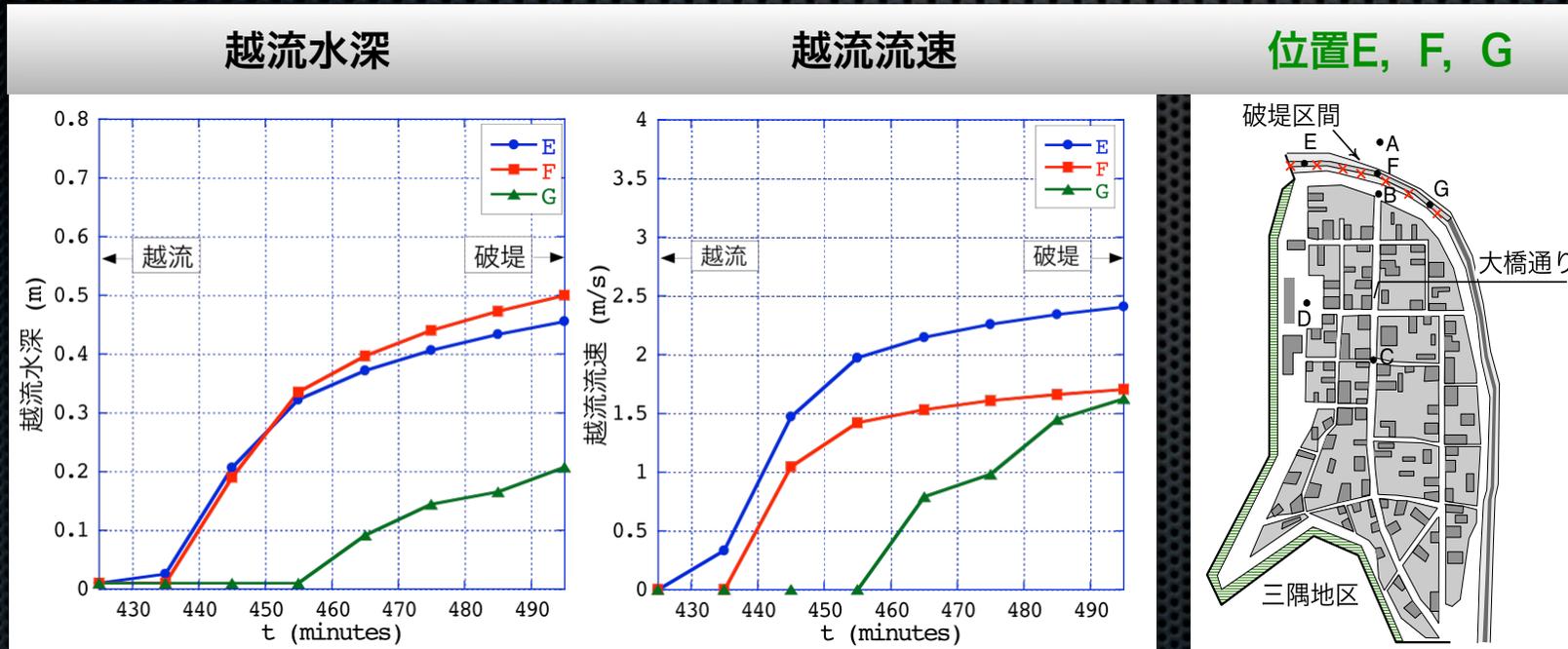
- 破堤開始時の破堤区間付近の堤内水位（観測：3m前後 ⇔ 再現：2.4m）
- 破堤開始時の三隅川下流付近での堤内水位（観測：5m程度 ⇔ 再現：5m）

モデルの適用例 ③ 破堤氾濫：破堤から5分後の浸水状況



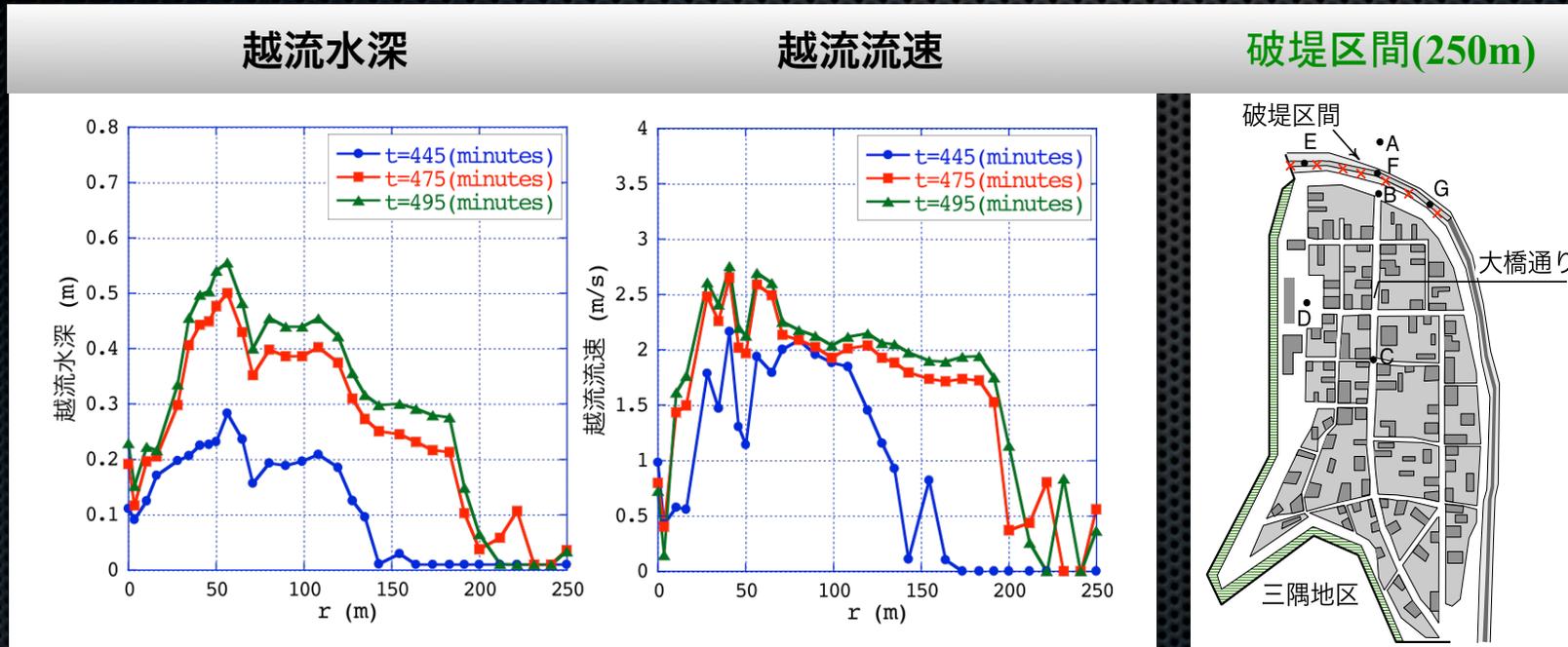
- 破堤区間付近の堤内地で大きな流速が発生する（瞬間破堤 > 漸次破堤 > 越流）
- 氾濫流は街路やオープンスペースに集中して浸水が起こる（瞬間破堤 > 漸次破堤 > 越流）
- 洪水流の主流線に沿った堤内地でも水深・流速が大きい（沿線川直下型）

モデルの適用例 ③ 破堤氾濫：破堤区間天端上の位置E(上流端), F(中間地点), G(下流端) での越流水深と越流流速の経時変化



- 堤防に沿って、越流開始時刻、越流水深と越流流速の経時変化を予測できる。
- 破堤区間から越水が始まったことが確認できる。特に、位置EとFでは、中小河川での越流破堤の目安（越流水深=0.4m）を一定時間超過していたことが確認できる。

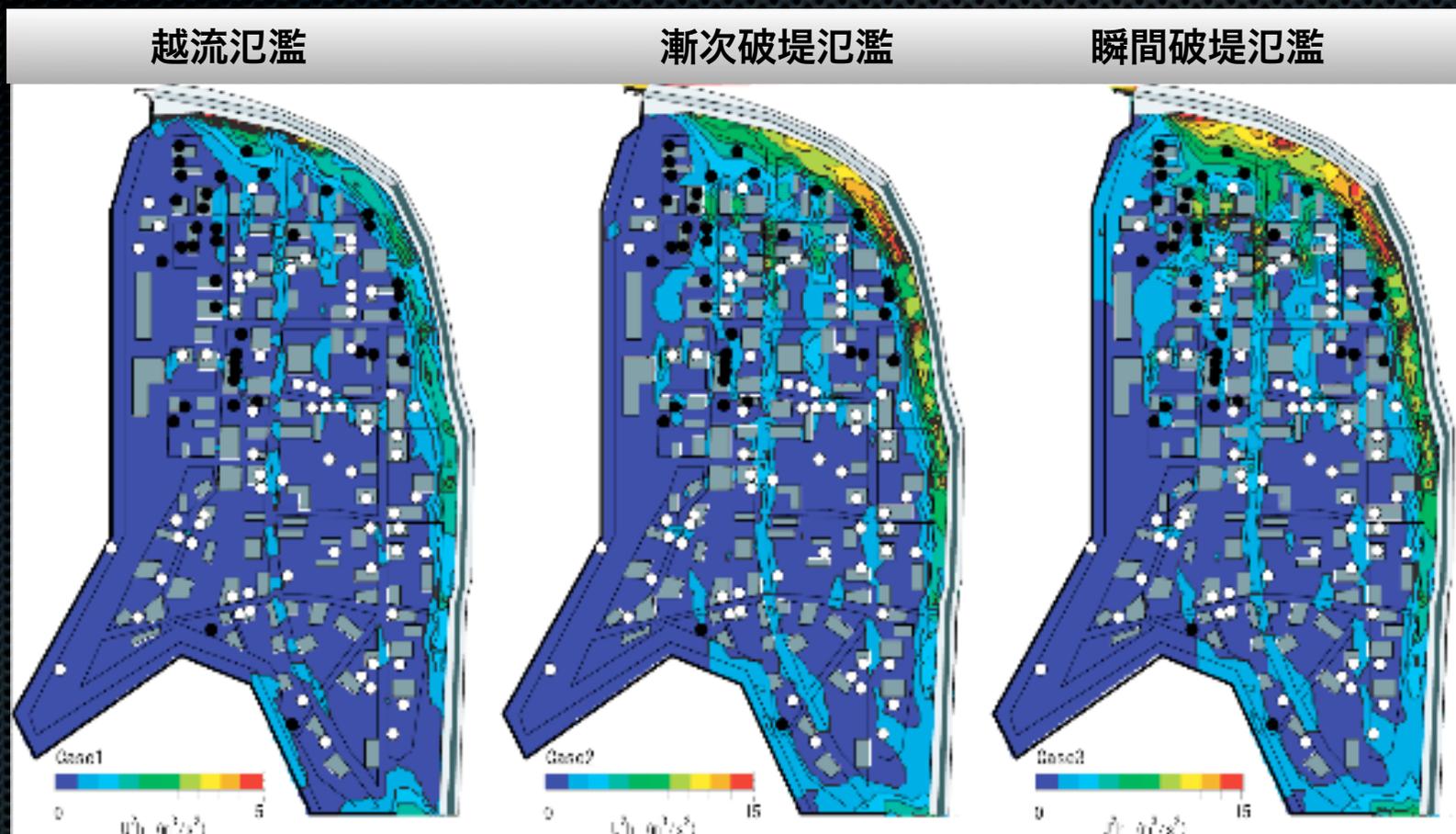
モデルの適用例 ③ 破堤氾濫：破堤区間での越流水深と越流流速の空間分布



- 破堤区間では約100mにわたって越流破堤の目安（越流水深=0.4m）を超過していたこと、破堤時刻（t=495s）での越流区間が破堤区間とおおよそ一致していることが確認できる。
- 破堤時刻では、約150mにわたって越流流速が2m/s以上であったことが確認できる。
- 堤防の決壊は、破堤区間の上流側から始まり、下流側に進行していったと推察される。

モデルの適用例

③ 破堤氾濫：氾濫形態の違いによる最大流体力(U^2h)と家屋被害（現地調査結果）



最大流体の力のコンター

●：流出家屋

○：全壊家屋

●最大流体力は、氾濫形態、河道線形（沿川直下型）および街路や家屋の配置等の市街地構造の影響を受ける。ただし、氾濫形態の影響は破堤区間付近に限定される。

●破堤区間付近での最大流体力は、瞬間破堤＞漸次破堤であり、最大で7倍程度大きい。

GISを用いたデータ作成

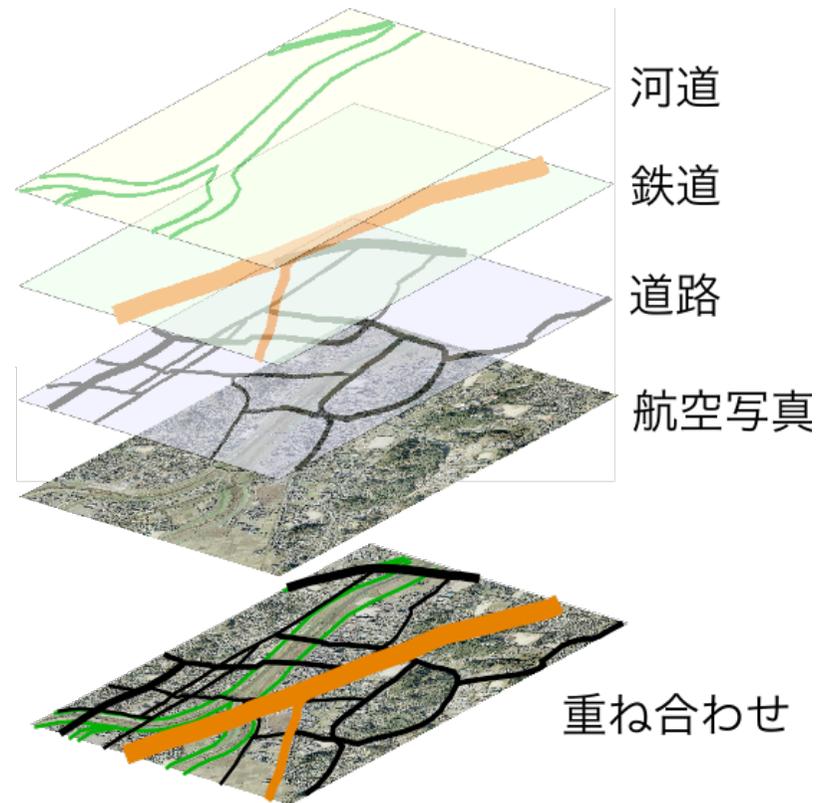
河道
鉄道
道路
地盤高等

属性情報



地図
航空写真

図形情報

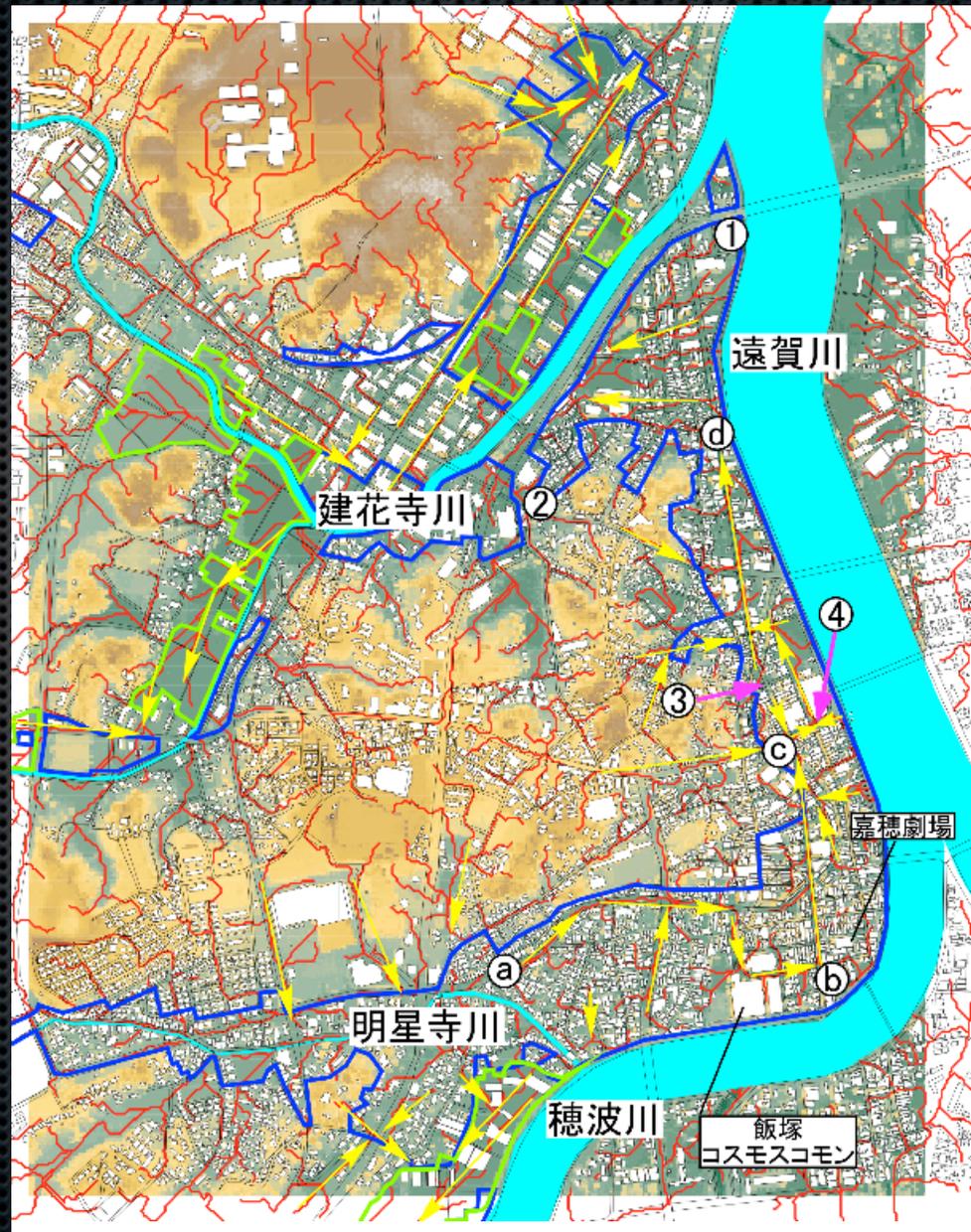
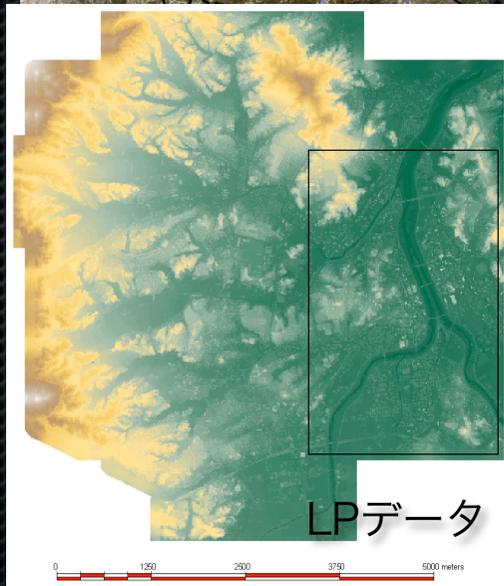
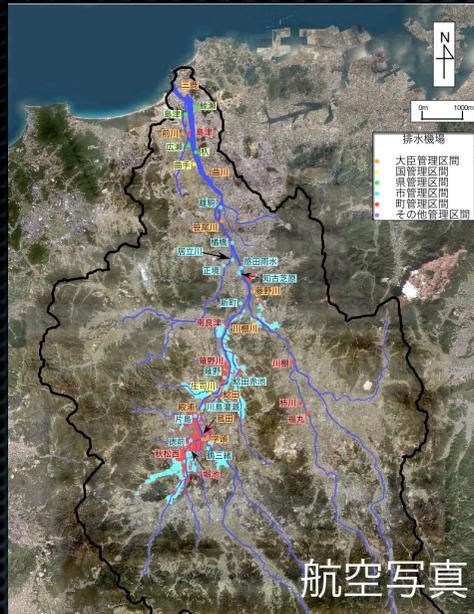


道路や河道の属性の検索
属性情報からの物体の特定

- ・ 座標の管理
- ・ ポリゴンにより土地利用状況がわかる

→ 効率的な氾濫解析データの作成

GISを用いたデータ作成



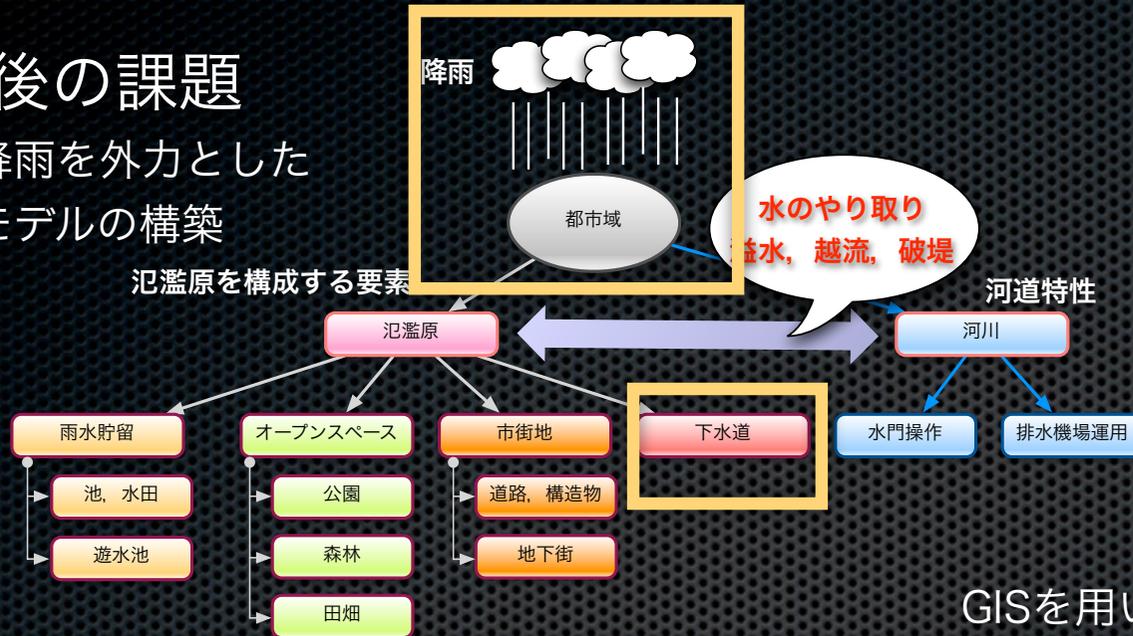
まとめ

都市域を対象とした河道と氾濫原を一体的に取扱った包括型氾濫解析モデルを用いることで、

- ★ 河道特性（線形，堤防の有無など）と氾濫原特性（市街地構造など）を考慮した上で，浸水プロセスを大きく規定する氾濫流量を的確に評価することが可能となる。
- ★ 河道特性と 氾濫原特性を踏まえた浸水プロセスの予測や家屋に働く流体力の評価などが可能となる。
- ★ 河道特性を考慮した上で，越水箇所を特定することができる。
- ★ また，一定以上の越流水深で一定時間以上にわたって越流状態が継続した場合に，越流箇所が破堤に至る可能性があるが，越流破堤のおおよその条件を定められる可能性がある。

今後の課題

降雨を外力とした
モデルの構築



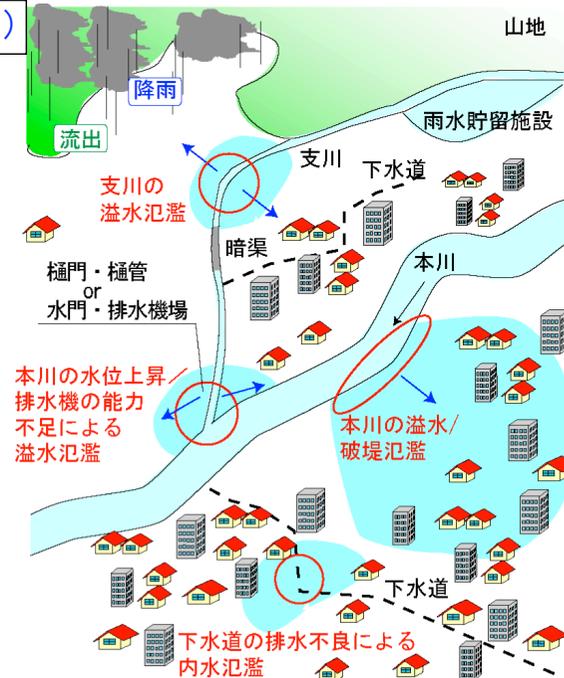
外力: 降雨(強度, 時間, 分布)

山地からの流出

河道と氾濫原を包括的に取り扱う

低平地での以下が得られる.

- 河道の洪水状況
- 支川の溢水氾濫状況
- 本川の水位上昇/排水能力不足による溢水氾濫状況
- 下水道の排水不良による排水氾濫状況
- 本川の溢水/破堤氾濫状況



GISを用いた都市域氾濫解析モデル用の効率的な解析データの作成方法について検討

