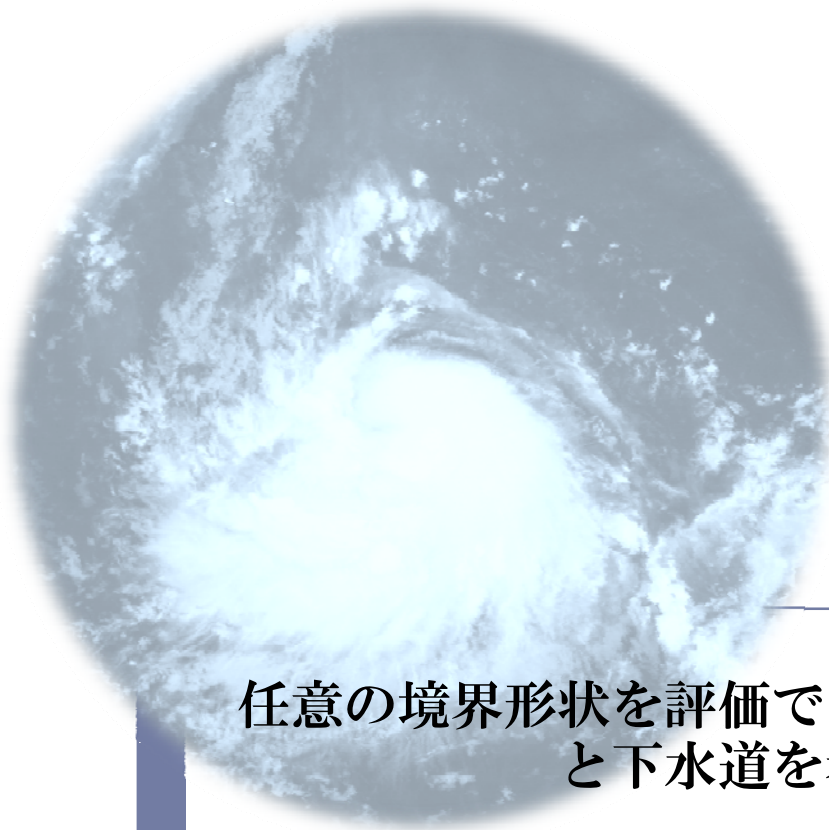
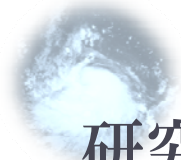




任意の境界形状を評価できるデカルト座標系浅水流モデル
と下水道を考慮した氾濫統合解析手法の開発

広島大学

内田龍彦



研究背景

2004年の高松市街地の主な水害記録

台風	氾濫形態	床上・床下浸水戸数
台風16号(08月30日)	高潮氾濫 (既往最高潮位T.P. 2.46 m)	15,561 (死者2名)
台風18号(09月07日)	高潮氾濫	293
台風23号(10月20日)	内水氾濫 (総雨量160 mm)	5,600

沿岸都市域では異なる形態の氾濫の危険に晒されている.

氾濫被害軽減

➡ 信頼度の高い 氾濫解析モデルによる氾濫流の再現・予測

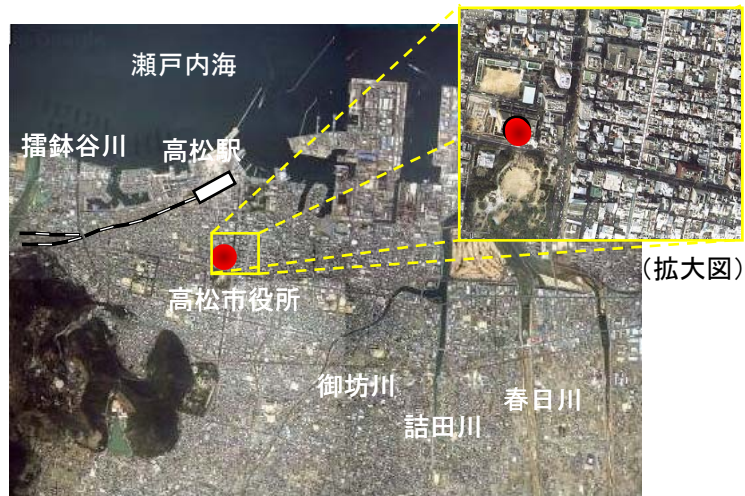


氾濫形態と都市構造の評価(氾濫統合解析)
基礎方程式の解析精度(高精度解析)

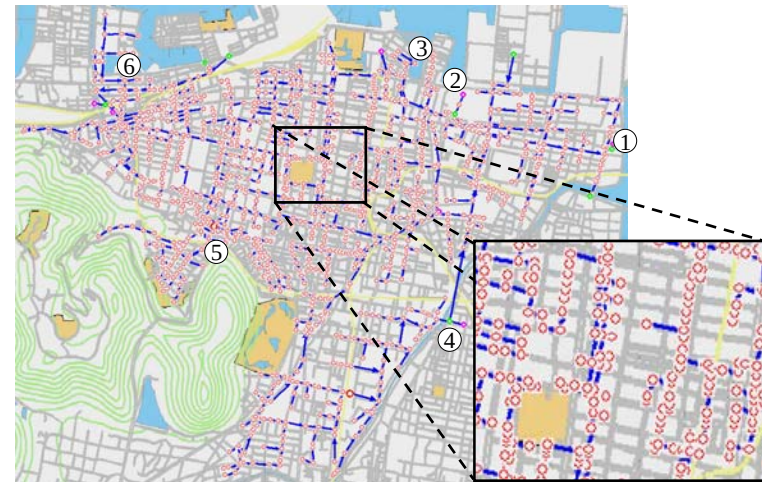


研究目的

沿岸市街地の高潮氾濫と内水氾濫を同時に解析できる統合解析手法の開発



高松市街地の密集する建物群



○ ノード(マンホール) — リンク(管渠) ①～⑥:ポンプ

モデル化した高松市街地の下水道網

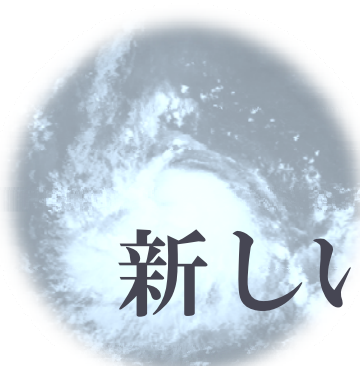
解析モデルの特徴

- ・ 地表面氾濫流の解析の高精度化
- ・ 地表面と下水道の流れの連成解析

検証



2004年台風16号
高松市の高潮氾濫



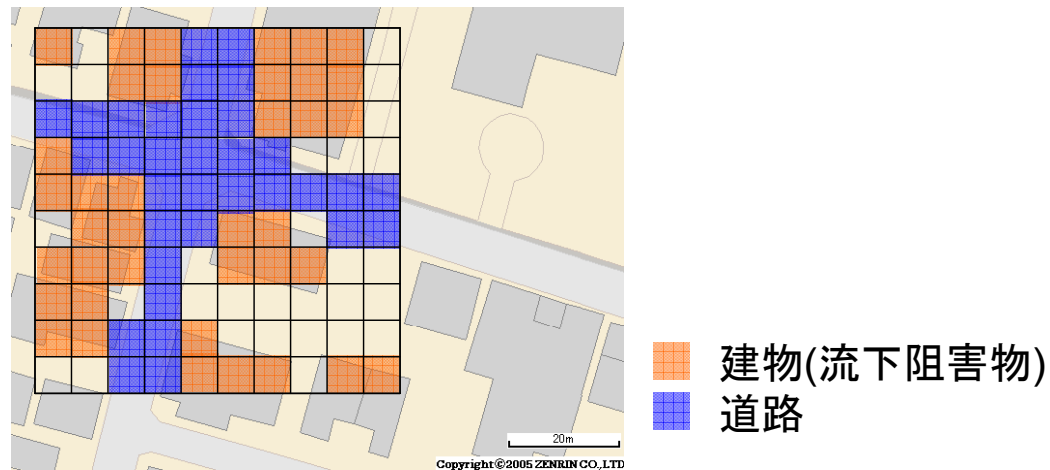
新しい地表面流解析モデルの開発

市街地の都市構造をデカルト座標系で高精度で表現する浅水流モデル



新しい地表面流解析モデルの開発

従来の氾濫数値解析法 (従来のデカルト座標系の問題点)



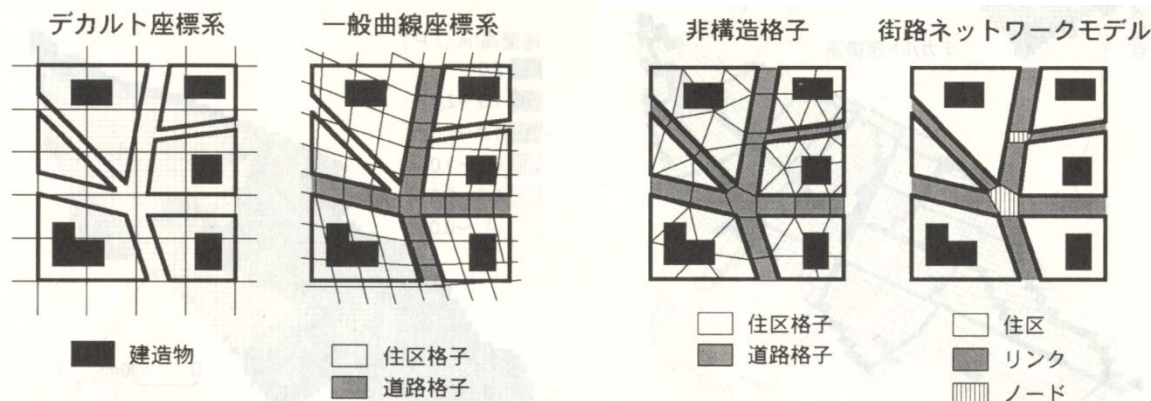
従来のデカルト座標系における格子分割のイメージとその問題点

市街地氾濫流は建物群や道路網の影響を強く受けるため、それらを適切に評価することが重要であるが、従来のデカルト座標系モデルでは小さな計算メッシュを用いてもそれらの形状が適切に評価できない。

新しい地表面流解析モデルの開発

従来の氾濫数値解析法 (都市構造を評価する種々のモデルの長所と短所)

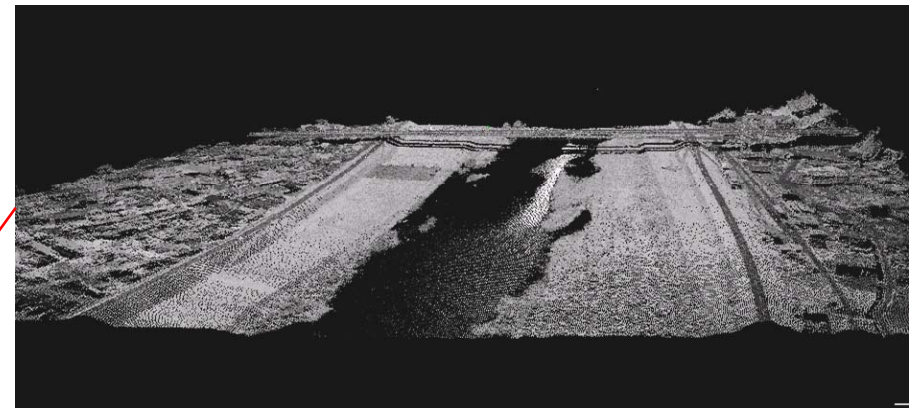
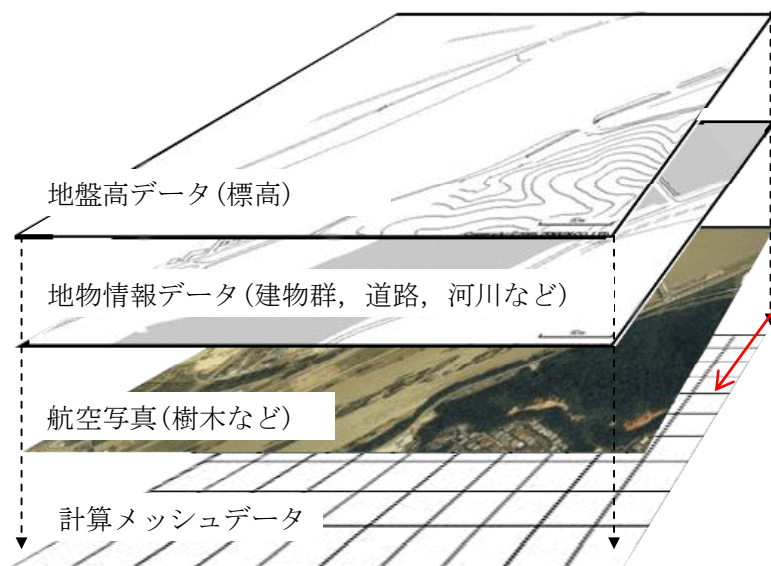
格子系 (座標系)	特徴	長所短評	短所短評	例
デカルト座標系モデル	良 ↑ 数値流体解析の精度 もしくは計算効率 ↑ 簡易 ↑ 格子生成及び計算 データの整備 ↓ 建物及び街路の評 価能力 良 ↓	格子生成など計算データの整備が極めて容易.	建物や街路の影響を考慮するのが困難.	岩佐ら, 1980 末次ら, 1998
一般座標系モデル		主要な街路を表現することが可能.	街路網の形状によっては主要街路を表現できない.	福岡・川島ら 1998
非構造格子モデル		複雑な地形, 境界形状を表現することが可能.	格子生成に時間と労力を要する.	重枝・秋山ら 2001
街路ネットワークモデル		密集市街地において複雑な街路網を評価することが可能.	格子生成にかなりの時間と労力が必要.	川池・井上ら 2002



参考: 川池ら, 都市域の氾濫解析モデルの開発, 土木学会論文集, No.698/II-58, 2002.

新しい地表面流解析モデルの開発

氾濫流解析における計算データ作成の例とレーザプロファイラによる三次元データ

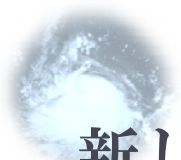


高精度の3Dレーザスキャナ(LISA)による河川とその周囲の三次元座標データ(DSM)

氾濫流解析における計算データ作成の例

近年, リモートセンシング技術は急速に発達しており, 氾濫計算などに求められる計算メッシュよりも詳細なデータを取得することも可能となってきた。

効率的に地表面の状況を評価でき, 計算データの書き換えに対応できる解析手法の開発が求められる。



新しい地表面流解析モデルの開発

目的



氾濫域データ整備が簡便であるデカルト座標系を用いつつ、複雑な都市構造を境界適合座標系のように捉え、氾濫流を高精度に計算できないだろうか？

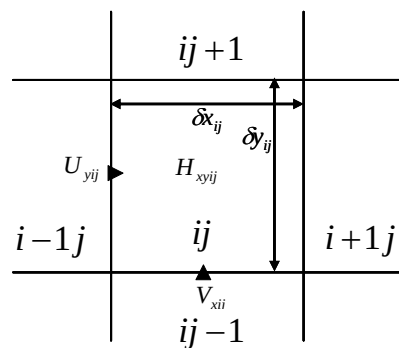


計算格子内の物理量およびパラメータの分布を考慮することによって、
流れの変化点と複雑な都市構造などの流れに影響を与える条件をデカルト座標系で高精度に表現できる
二次元浅水流解法を開発する。

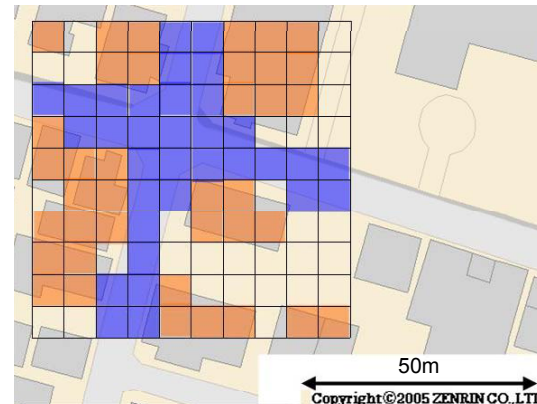


新しい地表面流解析モデルの開発

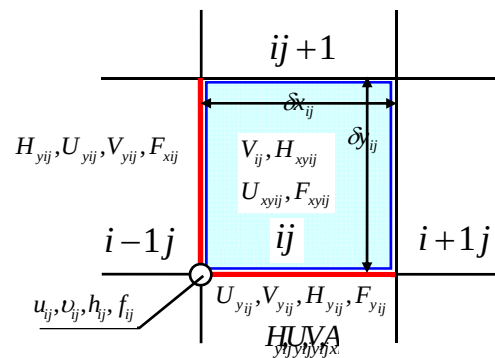
解析法のイメージと解析方法の概略



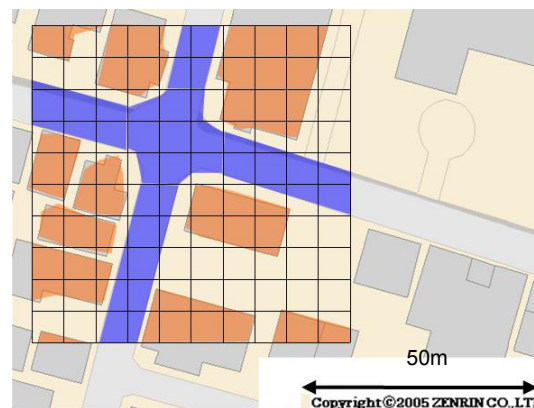
(従来のデカルト座標系)



全ての変数を各格子の値, 線平均値, 面平均値で与え, 保存型CIP法を応用して基礎方程式を連立し, 解く.



(本解析法)



デカルト座標系でも複雑な都市構造が表現可能.

計算過程に物理量の内挿補間が不要.

質量, 運動量の保存性を確保しつつ, 移流項(発散型)が高精度化.

新しい地表面流解析モデルの開発

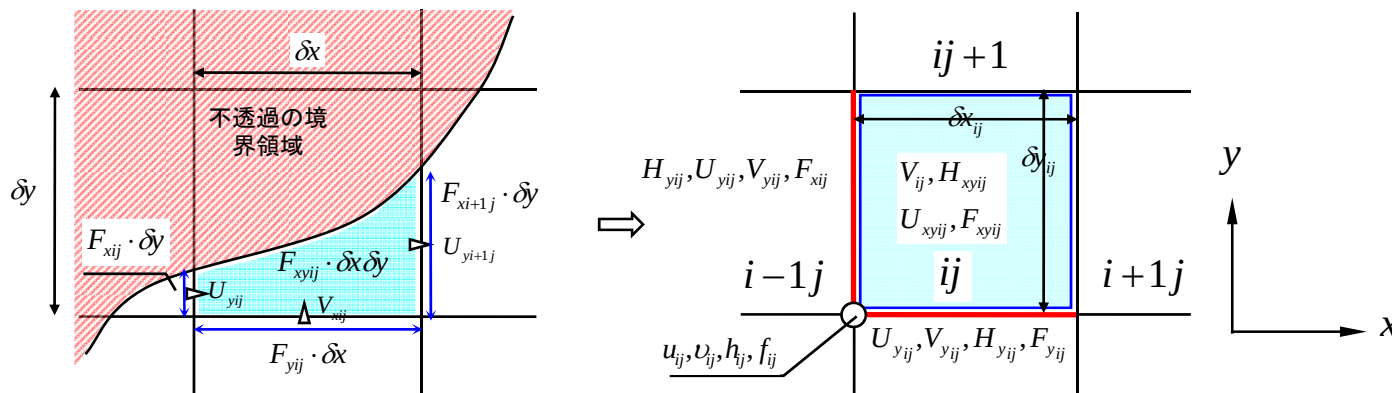
基礎方程式 (デカルト座標系) ~ 流体占有率を考慮した二次元浅水流方程式

連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{f} \frac{\partial f u_j h}{\partial x_j} = 0$$

運動方程式

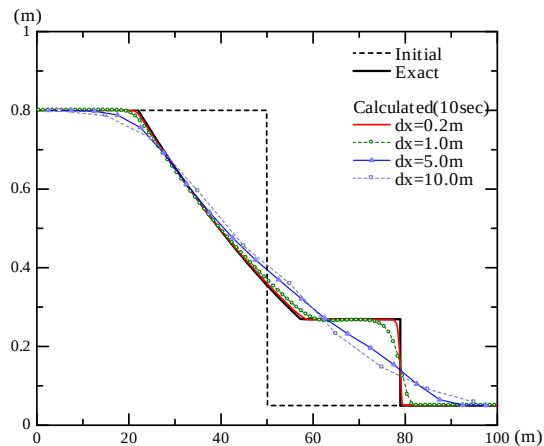
$$\frac{1}{fh} \left(\frac{\partial f u_i h}{\partial t} + \frac{\partial f u_i u_j h}{\partial x_j} \right) = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x_i} - \frac{\tau_{0i}}{h} / \rho + \frac{1}{fh} \frac{\partial h \tau_{ij}}{\partial x_j}$$



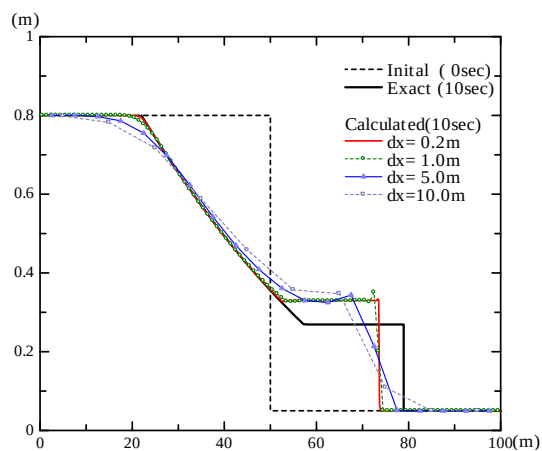
不透過の境界領域を空隙率で表現したコントロールボリュームと本解析における主要な変数の配置

新しい地表面流解析モデルの開発

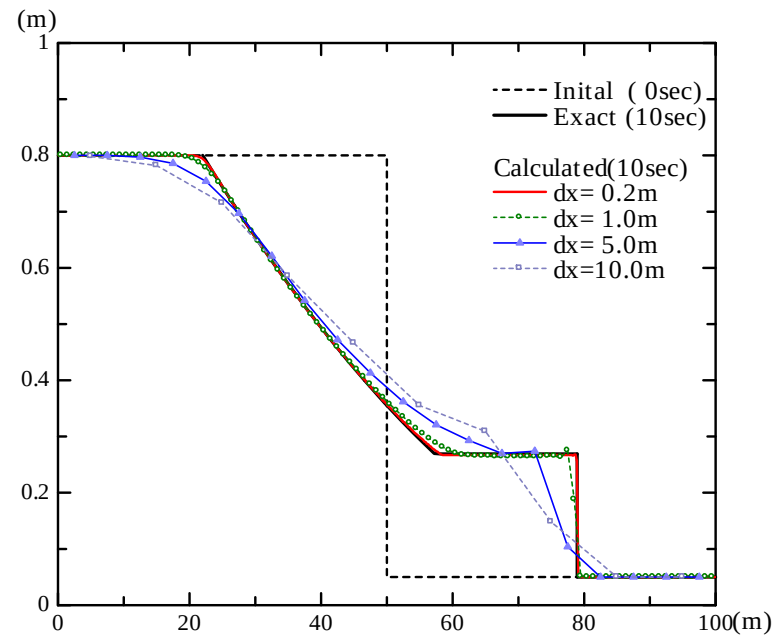
解析法の検証（一次元ダムブレイク問題に対する格子解像度の影響）



a) UPWIND解法, Staggered格子系



b) 非保存型CIP解法

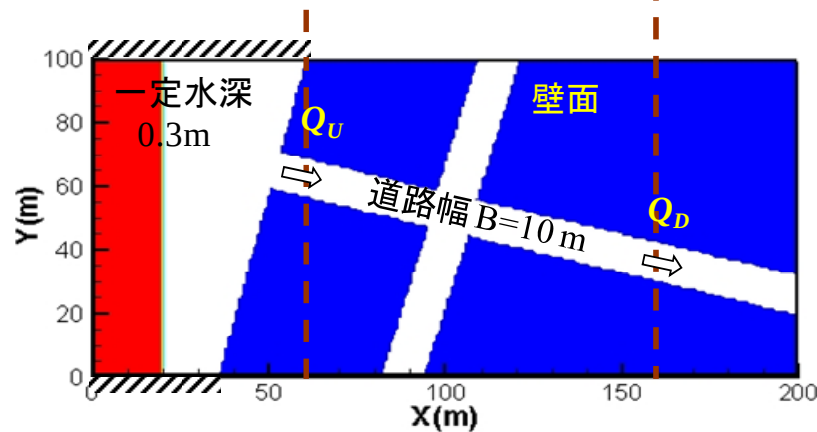


c) 保存型CIP解法(本解析法)

- ・ 正の段波波高は正しく評価される。
- ・ 負の段波先端は正しく評価される。
- ・ 粗い格子でも正の段波先端位置が正しく評価される。

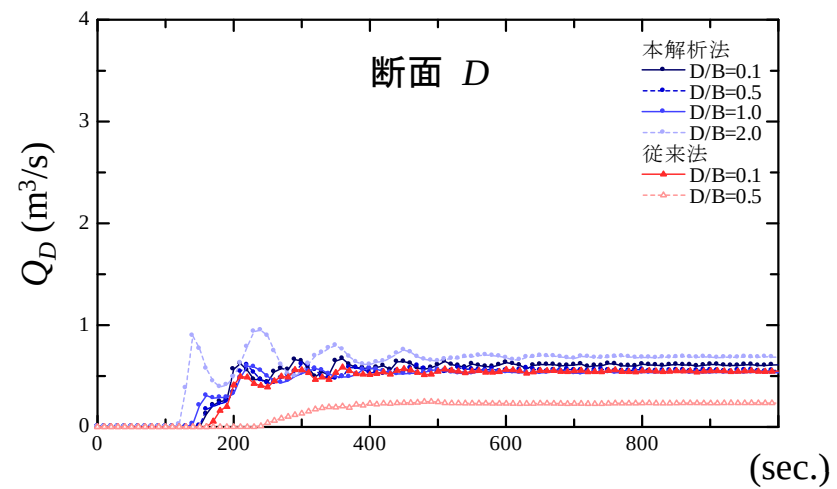
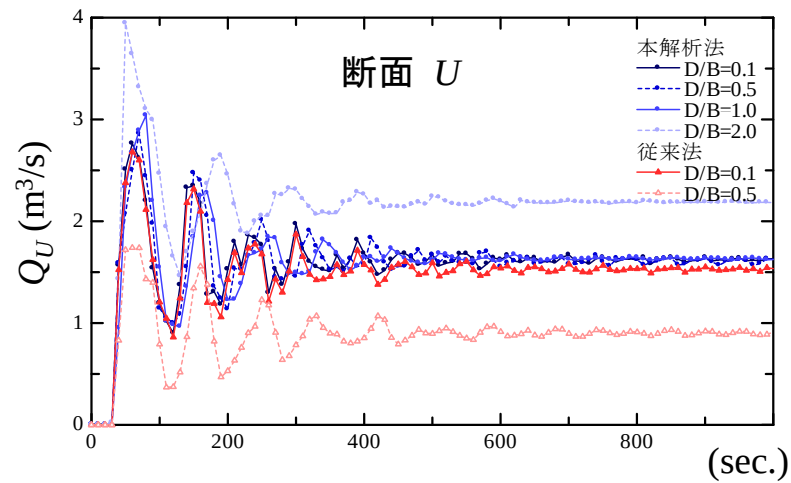
新しい地表面流解析モデルの開発

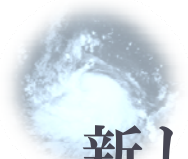
解析法の検証（市街地街路網の評価に対する格子解像度の影響）



解析条件

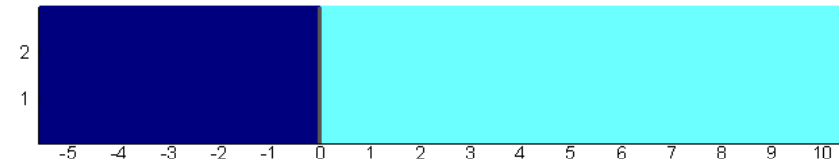
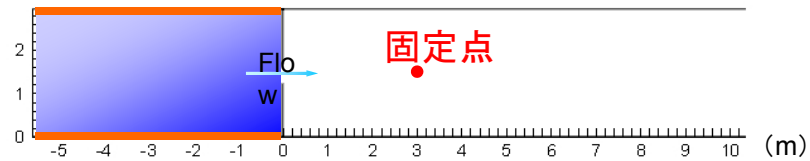
道路幅 B	計算格子 $D=dx=dy$	D/B
10 m	1.0m	0.1
	5.0m	0.5
	10 m	1.0
	20 m	2.0



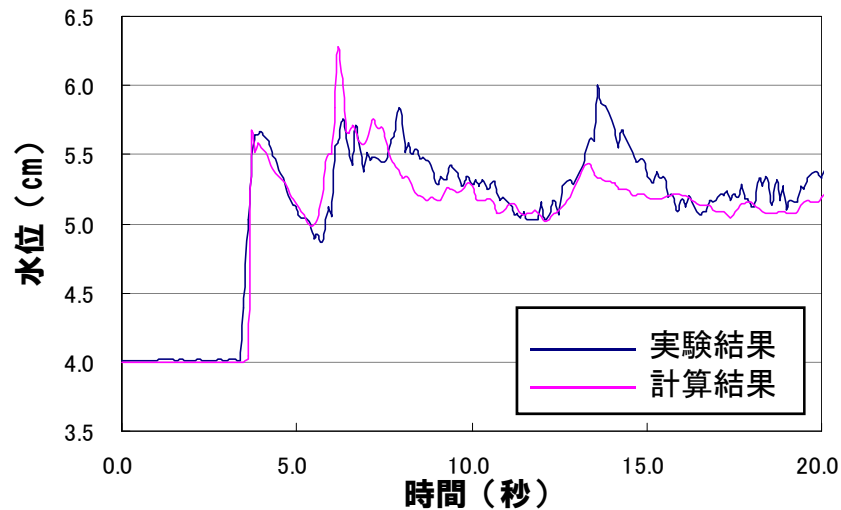


新しい地表面流解析モデルの開発

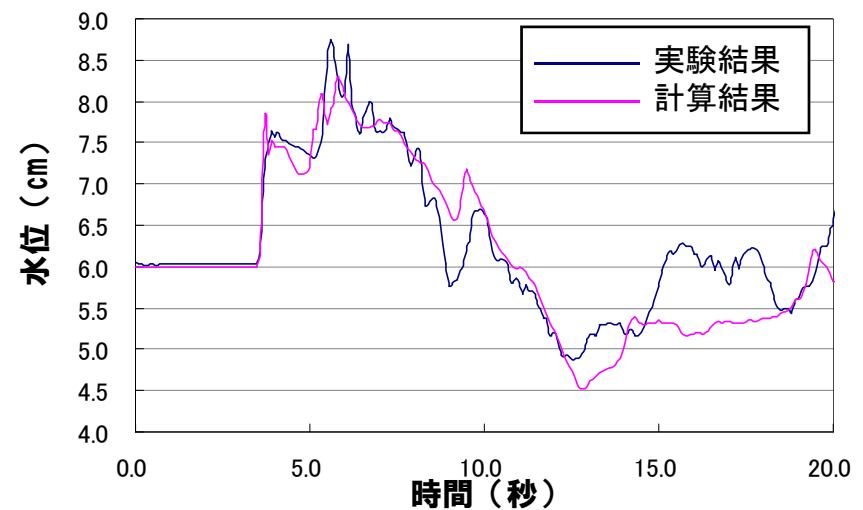
解析法の検証（破堤水理実験結果との比較-家屋がない場合）



【計算結果】



【下流端水位4.0cm】

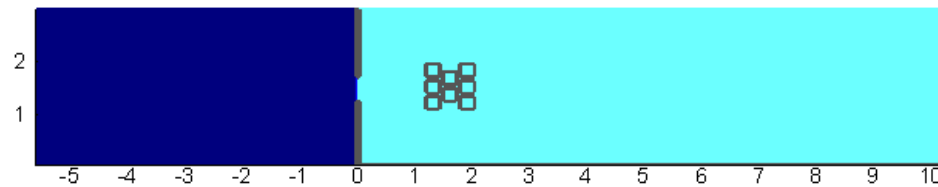


【下流端水位6.0cm】

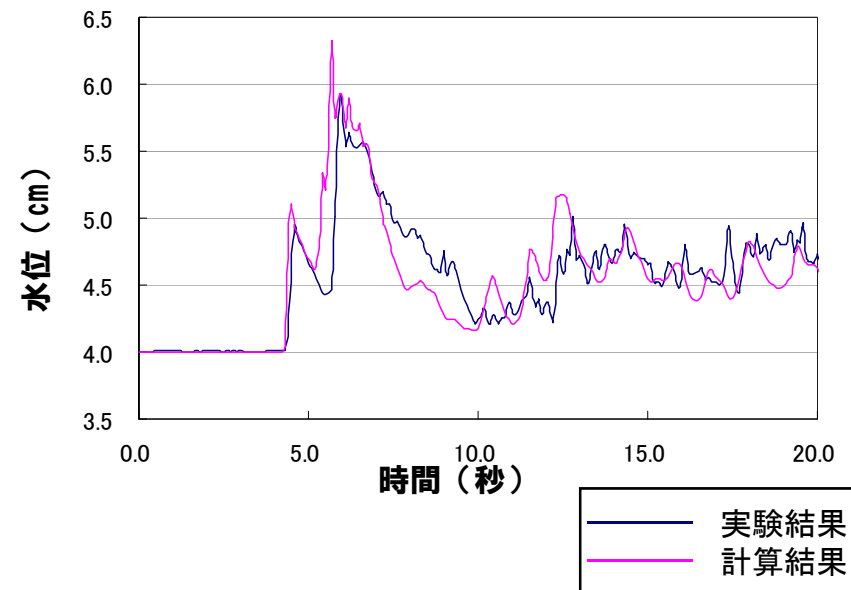
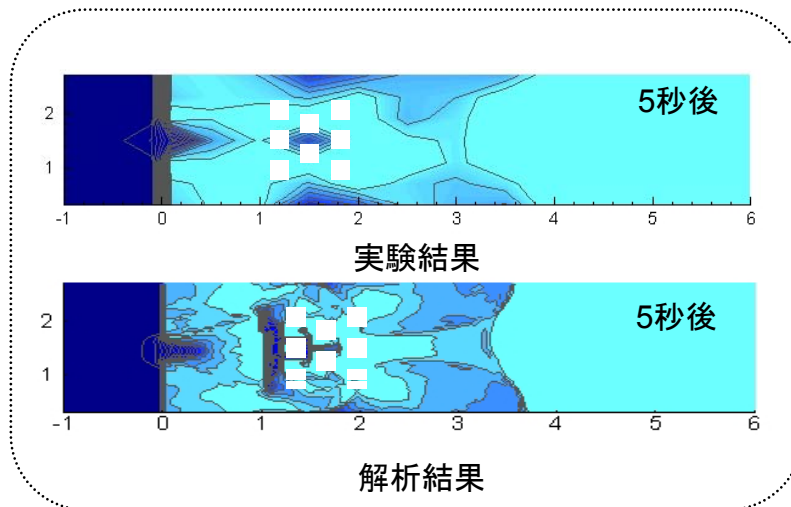
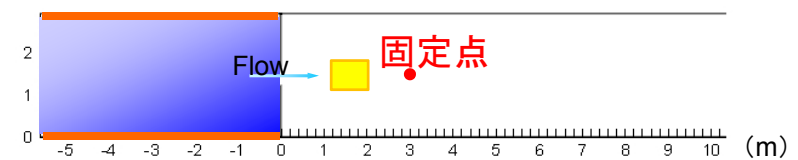


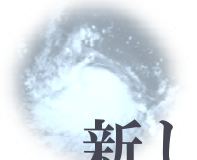
新しい地表面流解析モデルの開発

解析法の検証（破堤水理実験結果との比較-家屋がある場合）



【計算結果】





新しい地表面流解析モデルの開発

まとめ

- 1) デカルト座標系で任意の境界形状を評価するために、各計算格子の点値、線・面平均値を同時に解くことができる二次元浅水流の保存型の陽解法を提案した。
- 2) 従来のCIP解法で課題であった段波先端部で波高が高くなる問題を解決し、従来の解法に比べ少ない格子点数で段波を表現することが出来ることを示した。また、計算格子スケールの流れ場や境界条件の変化を捉えることができることを示した。
- 3) 初期水深によって段波の伝達速度や段波通過後の水位の変動特性が大きく異なる実験結果を、本解析法は良好に再現することを示した。
- 4) 破堤部に家屋が配置される条件において、実験結果と計算結果を比較し、計算結果は常射流混在場に建物などの障害物が存在する場合においても、時空間的に信頼できることを示した。

本解析法の課題，欠点

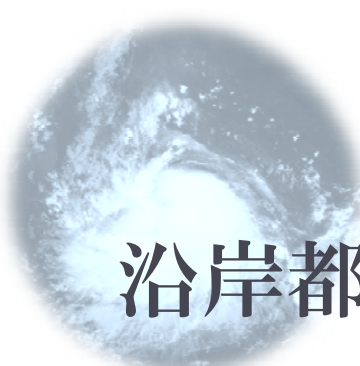
計算時間：少なくとも移流項の計算に4倍の計算量。

格子の大きさ：要求される計算格子サイズが空間的に異なる場合。

壁面以外の評価法：基礎方程式に陰的に含まれる項の評価（水際など河床形状に関するものと粗度係数）

安定性：移流項が高精度化されるため、数値粘性がほとんど無いこと。



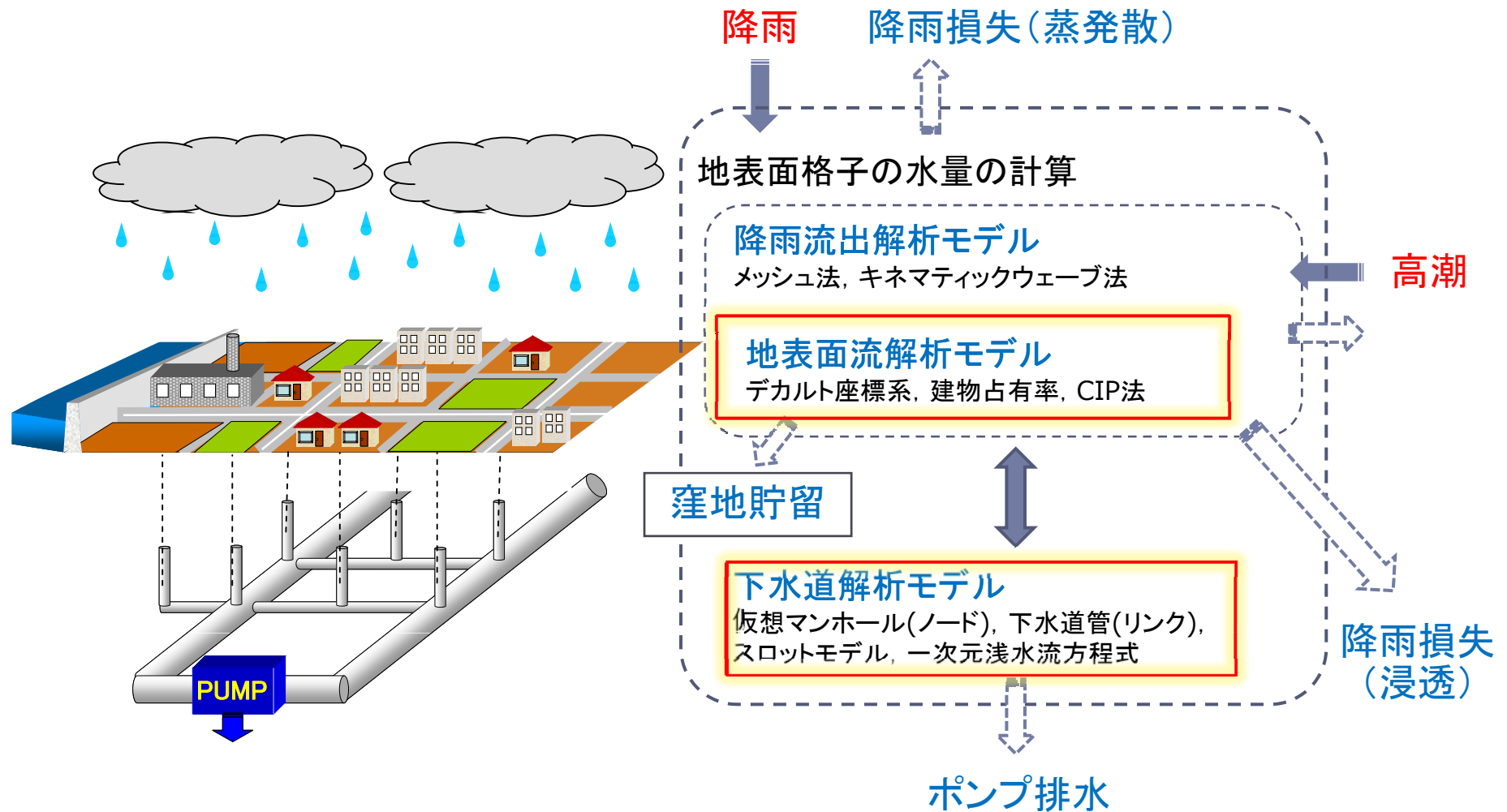


沿岸都市域の統合氾濫解析システムの開発

下水道を考慮した高松市の高潮氾濫解析の例



沿岸都市域の統合氾濫解析システム



地表面流解析モデル

外系からの質量，運動量の流入出の導入

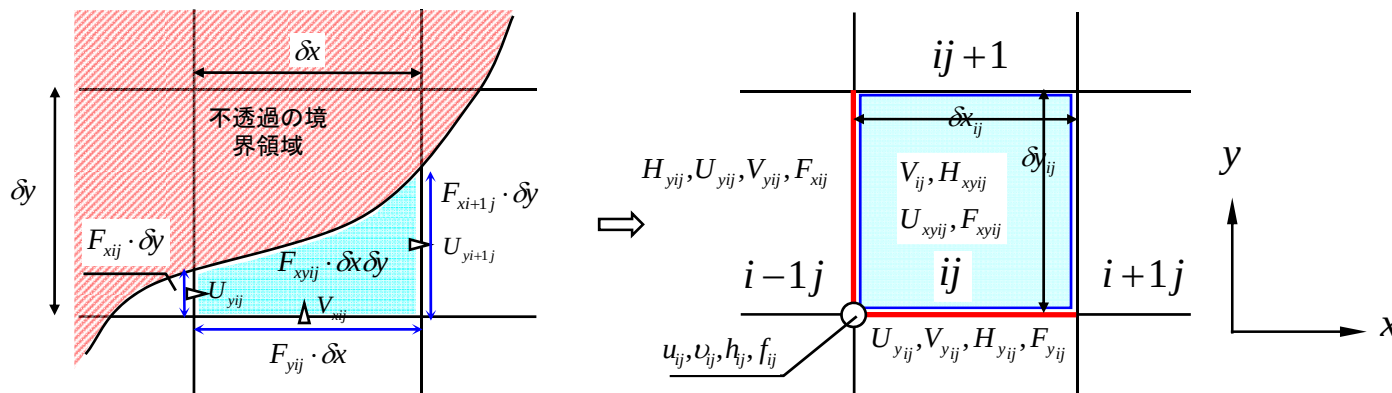
連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{f} \frac{\partial f u_j h}{\partial x_j} = \frac{1}{f \Delta x \Delta y} \sum_k Q_k$$

外系からの質量，運動量の流入出
(降雨，高潮氾濫水，下水道との水交換・・・)

運動方程式

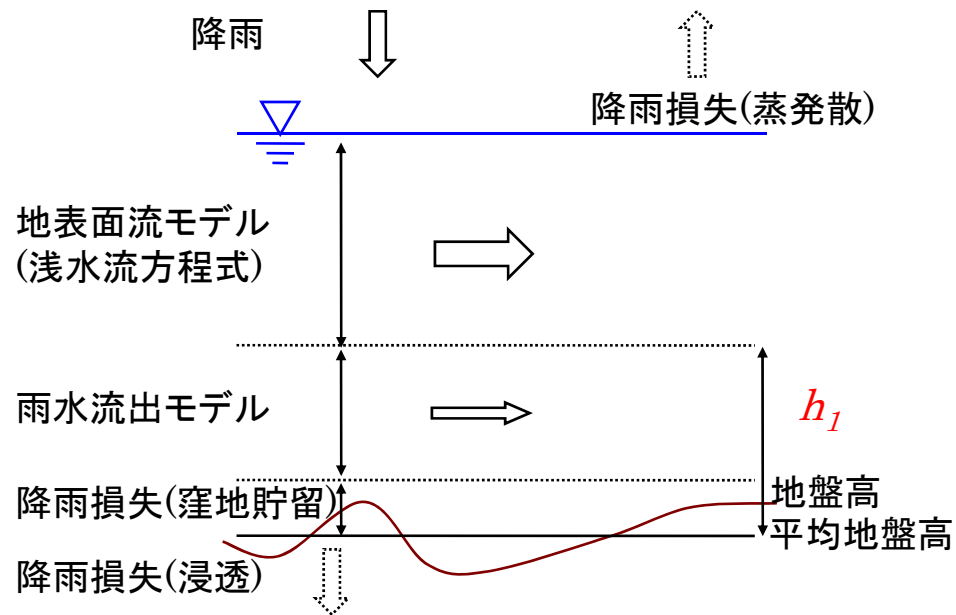
$$\frac{1}{fh} \left(\frac{\partial f u_i h}{\partial t} + \frac{\partial f u_i u_j h}{\partial x_j} - \frac{1}{\Delta x \Delta y} \sum_k M_k \right) = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x_i} - \frac{\tau_{0i}}{h} + \frac{1}{fh} \frac{\partial h \tau_{ij}}{\partial x_j}$$



不透過の境界領域を空隙率で表現したコントロールボリュームと本解析における主要な変数の配置

降雨流出解析モデル

地表面流解析モデルと降雨流出解析モデル



有効雨量(メッシュ貯留分)

$$r_e = r - f - DS - E$$

r_e : 有効雨量, r : 降雨強度, f : 降雨浸透能,
 DS : 窪地貯留, E : 蒸発散量

降雨浸透能

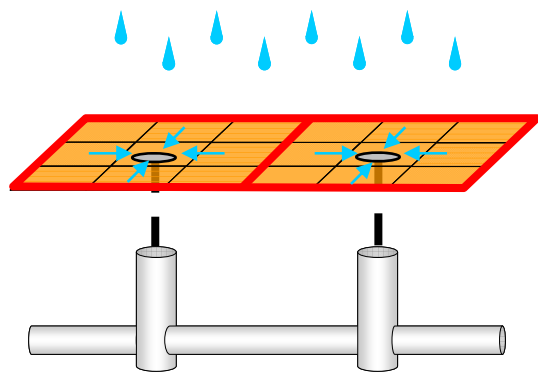
$$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt}$$

f_c : 初期浸透能, f_0 : 最終浸透能, k : 減衰係数, t : 時間

降雨流出解析は地表面流モデルと同じ格子で計算されるが、雨水流出水深 h_1 を設定し、各解析で扱う水深を区別する。

降雨流出解析モデル

下水道管内流モデルと降雨流出解析モデル



(分布型モデル)

□: ノード集水域、
■: 地表面格子

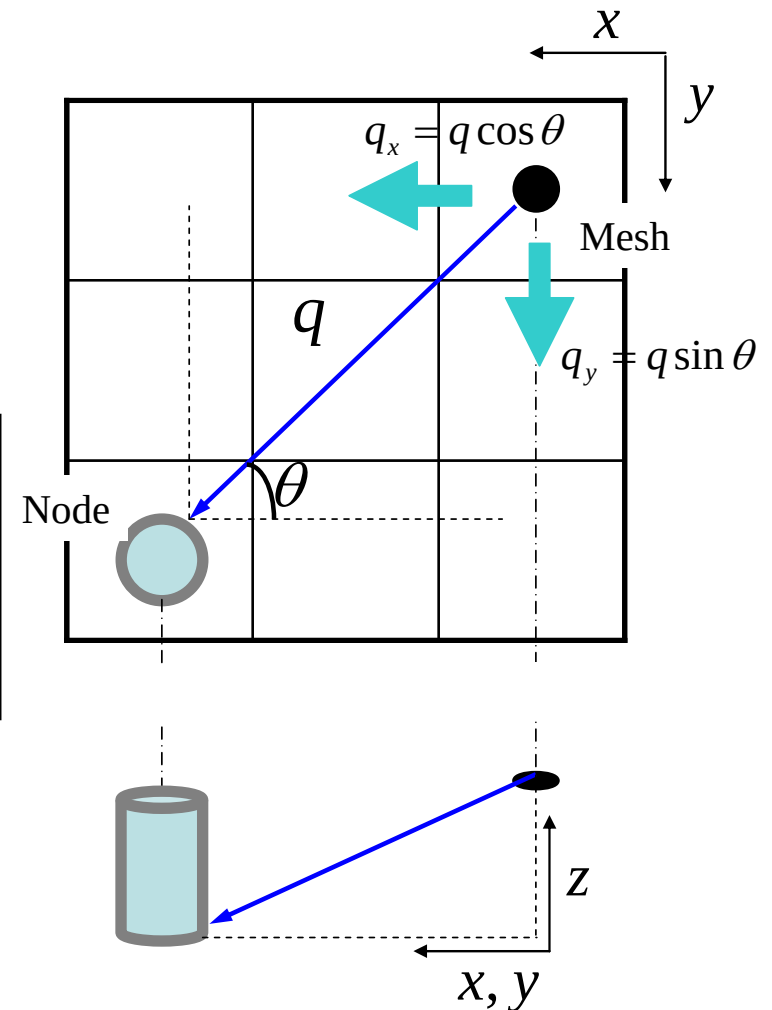
(流出方法)

- ①各格子から流出する(最も近い)ノードの方向の算出
- ②流量算定。
- ③隣接する格子に方向成分与える。

(流量算定式: マニング式)

$$q = \frac{1}{n} h^{5/3} i^{1/2}$$

q : 流出流量
 n : 粗度係数
 h : 水深
 i : 勾配



下水道管内流解析モデル

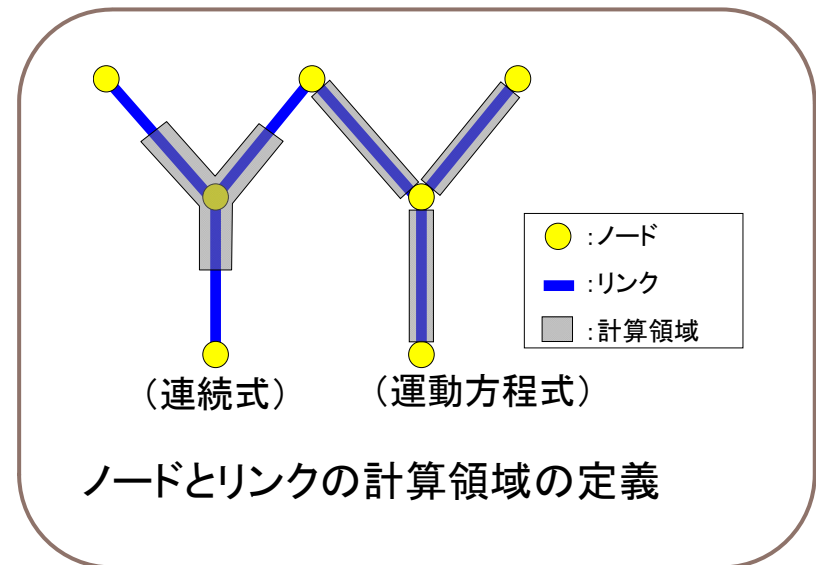
1次元浅水流方程式とスロットモデル

連続式

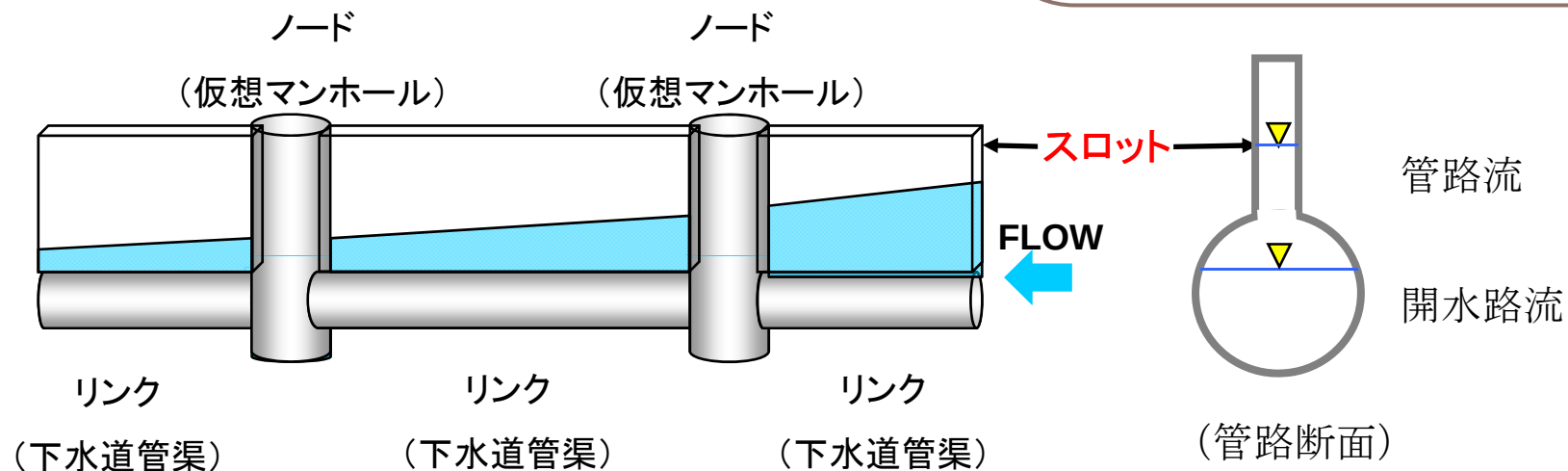
$$A_n \frac{\partial h_n}{\partial t} + \sum_i Q_i = 0$$

運動方程式

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A_l} \right) + gA_l \frac{\partial H_n}{\partial x} + gn_l^2 \frac{Q^2}{A_l R_l^{4/3}} = 0$$



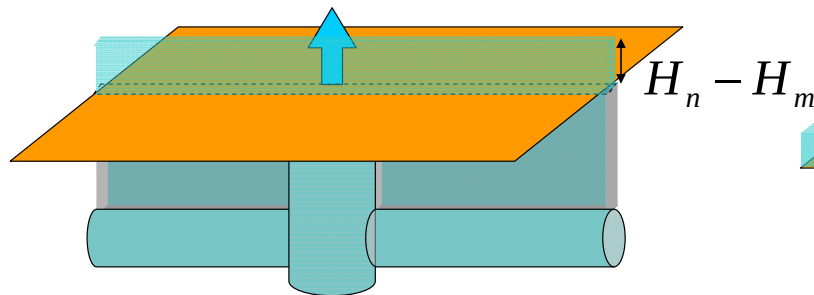
ノードとリンクの計算領域の定義



下水道管内流解析モデル

下水道管内流モデルと地表面流解析モデル (降雨流出解析モデル)

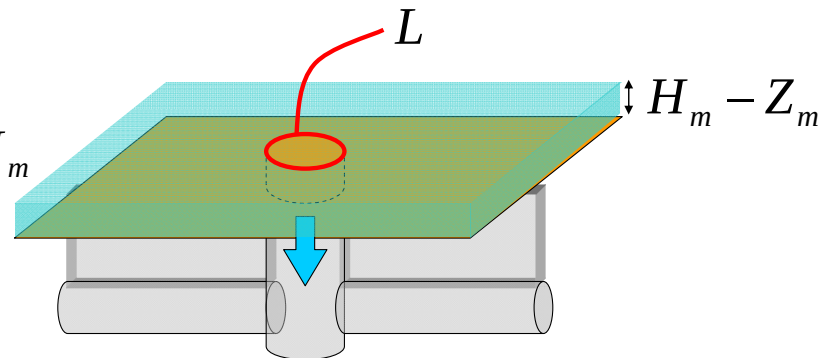
(下水道から地表面への流出)



下水道管内解析モデルにより計算

ノードで計算された水位から計算される地表面を超える水量を該当する格子に与える.

(地表面から下水道への流入)



段落ち公式により計算

$$Q_{in} = \mu L (H_m - Z_m) \sqrt{gh}$$
$$h = \min(H_m - Z_n, H_m - Z_m)$$

Q_{in} : 地表面から下水道への流入量, H_m : ノード上のメッシュ水位, Z_m : ノード上のメッシュ地盤高さ, μ : 段落ち係数, L : ノード周長

解析対象

台風0416による高松市街地の高潮災害

(潮位)

夏の大潮と台風による吸い上げが重なり、既往最潮位を超えるT.P.2.46mを記録

<解析条件>

(解析時間)

・8/30/21:30~31/01:00

(海域・河川域)

・観測潮位

(水際境界条件)

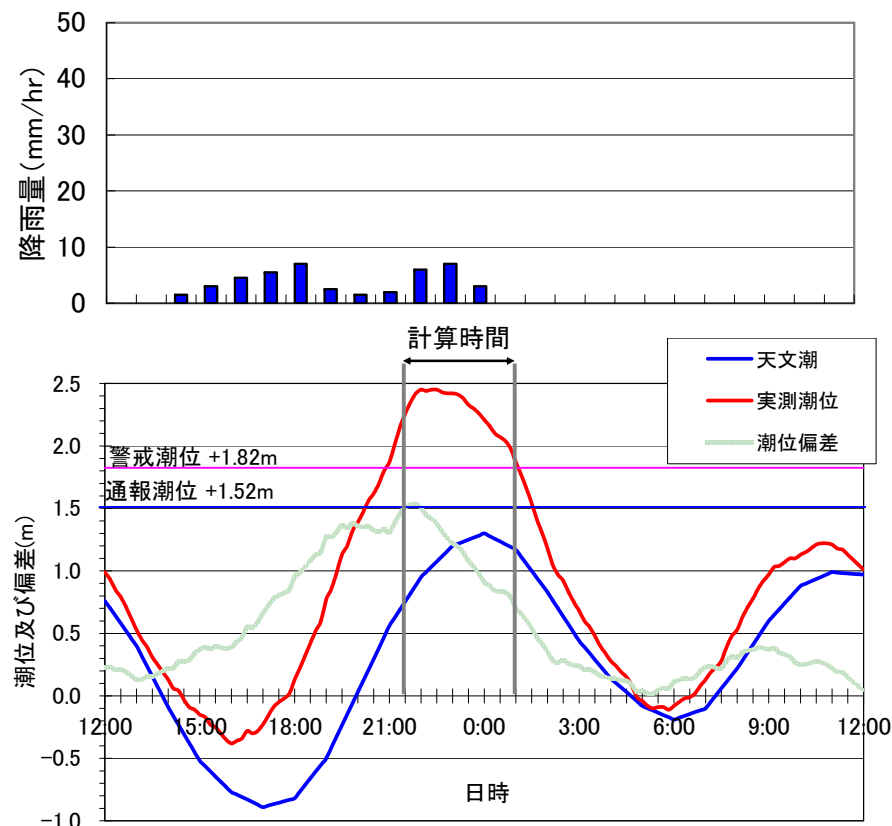
・最小水深 $h_{min}=0.05m$

(下水道網)

・ポンプ考慮せず

(解析パターン)

・下水道網の有無



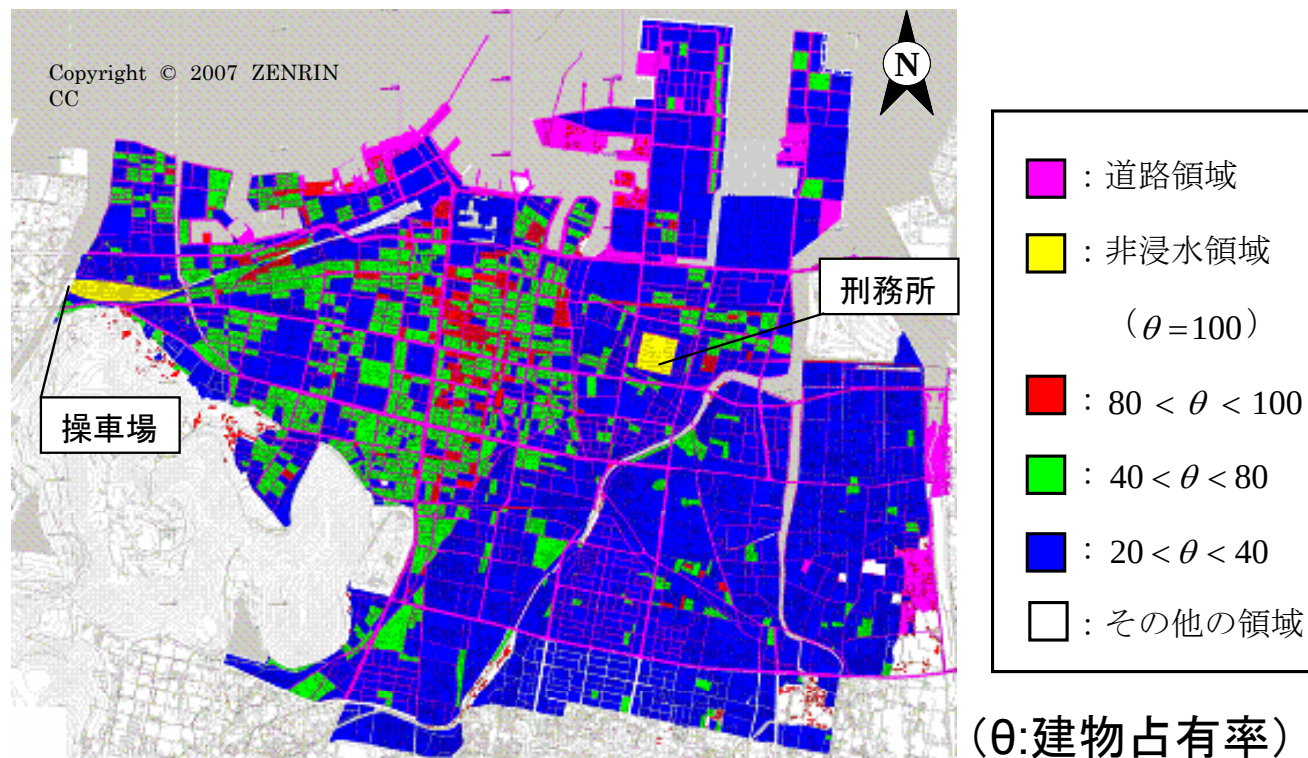
降雨量、潮位及び潮位偏差

(2004年8/30~8/31)

高松市街地のデータ整備

地表面被覆データの整備

浸透面積率 IA	初期浸透能 f_c (mm/hr)	蒸発散量 E (mm/hr)	窪地貯留 DS (mm/hr)	粗度係数 n_r
1	1	0.22	6	0.030
0.5~1.0	1	0.22	4	0.015
0~0.5	1	0.22	2	0.015



高松市街地のデータ整備

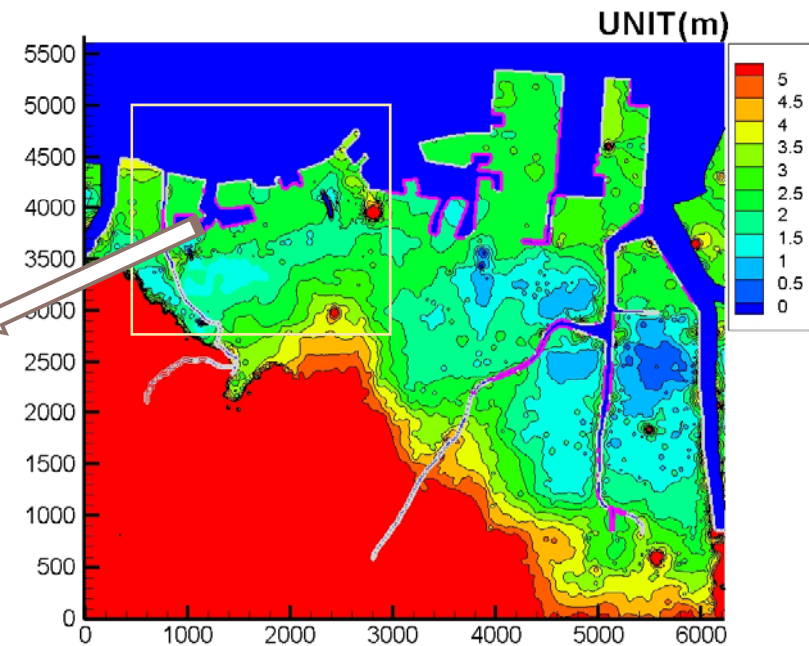
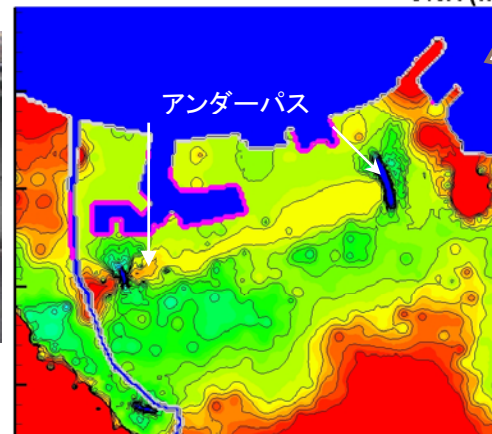
地盤高データの整備

地盤高データ: GPS測量

鉄道盛土,
アンダーパス: 地盤高データで考慮



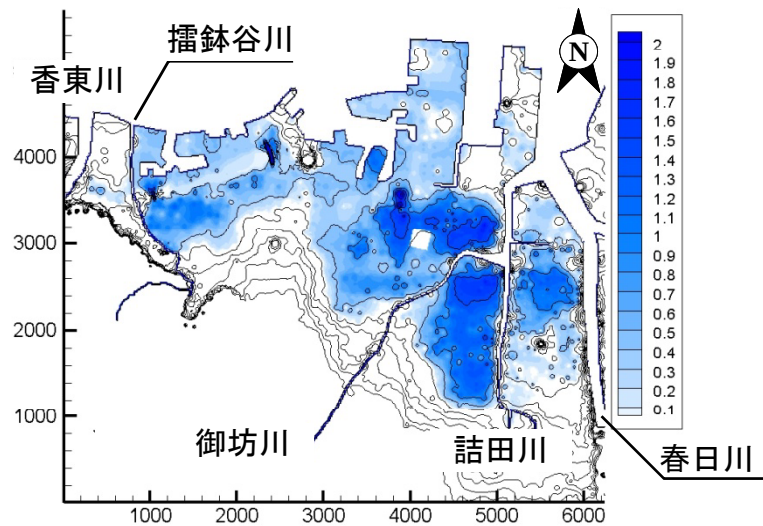
西部アンダーパス



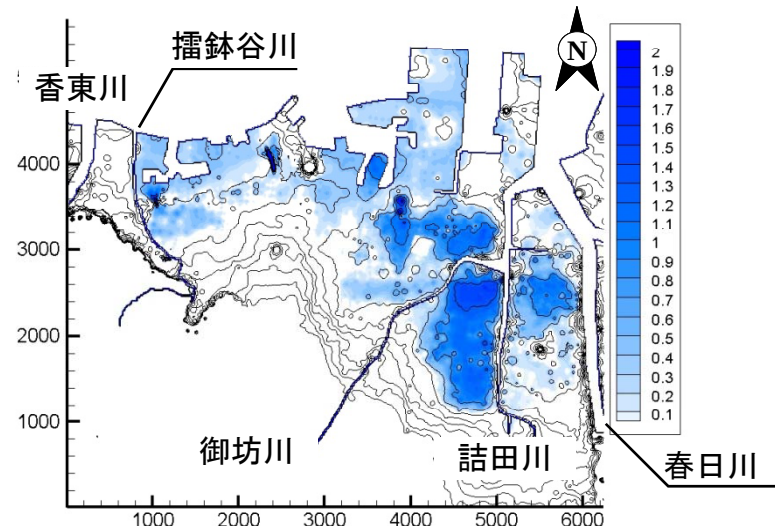
沿岸部から内陸部にかけてT.P.2m以下の低地が広く分布し、高潮氾濫が広がりやすく、排水しにくいことが分かる。

解析結果

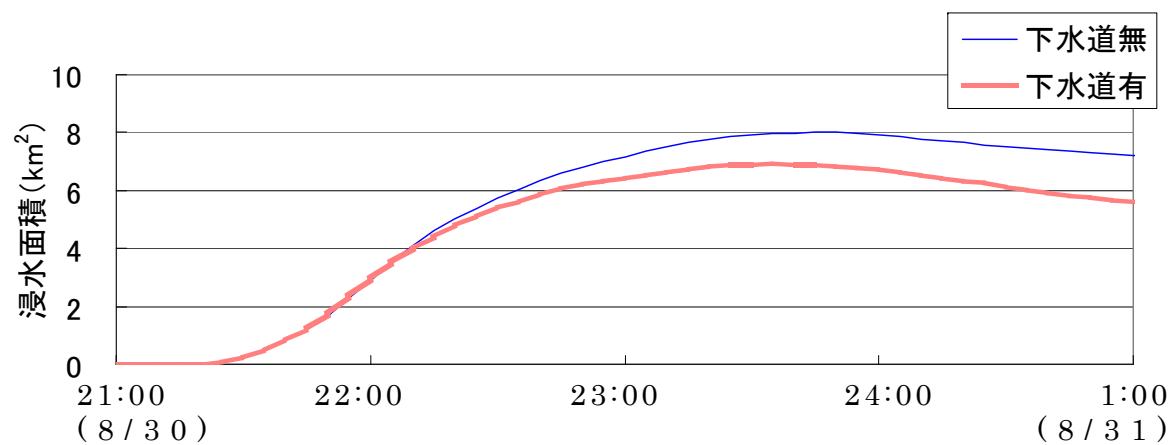
下水道網を考慮する場合としない場合の最大浸水深分布の比較



地表面流解析モデルのみ(下水道無)

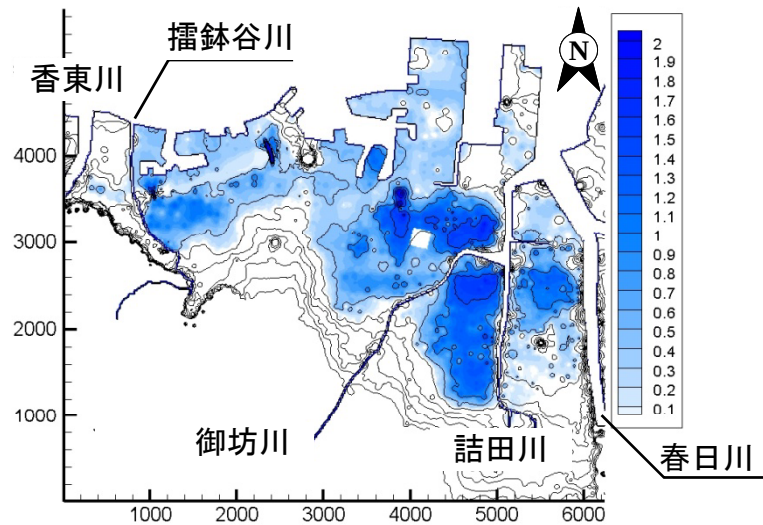


本統合解析手法(下水道有)

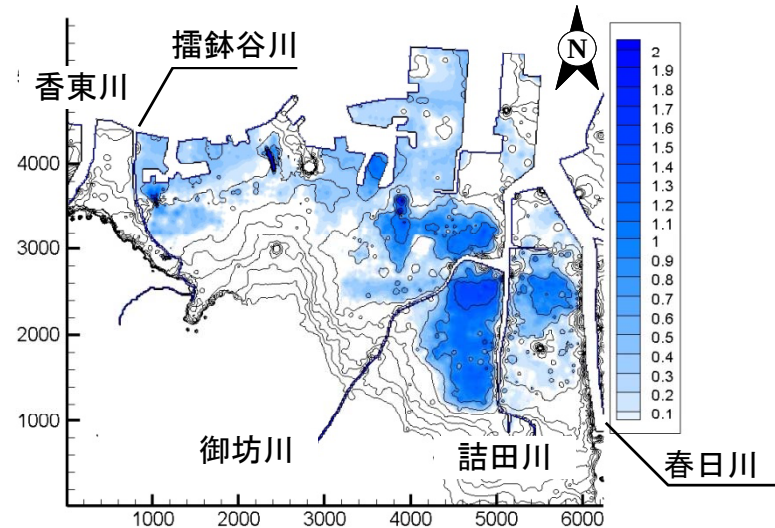


解析結果の比較

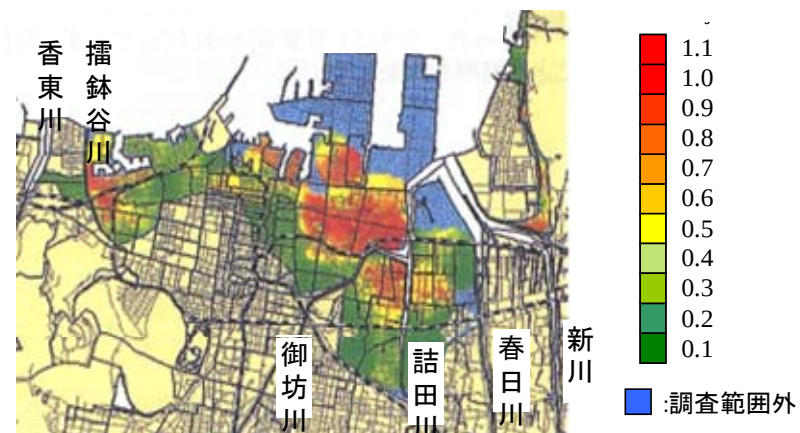
氾濫実績と本解析結果の比較



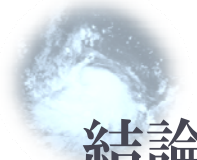
地表面流解析モデルのみ(下水道無)



本統合解析手法(下水道有)



実績調査による浸水深分布

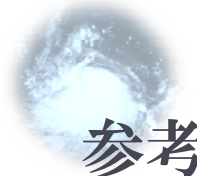


結論

まとめと今後の課題

- 1) 本研究では、沿岸部都市域において高潮による水害の発生防止から被害の軽減、迅速な復旧までを検討するために、地表面流、下水道流、地表流出を同時に考慮できる統合解析手法を構築した。
- 2) 本統合解析手法を2004年台風16号による高松市高潮氾濫に適用し、本手法の妥当性を示すとともに、高潮氾濫解析における統合氾濫解析の必要性を示した。
- 3) 今後、2004年台風23号時の内水氾濫に対して本解析手法を適用し、本手法の検証と有効な被害軽減対策を検討する予定である。





参考文献

二次元汜濫流解析モデル

- 岩佐義朗, 井上和也, 水島雅文(1980) 汜濫水の水理の数値解析法, 京都防災研究所年報, 第23号B-2, pp. 305-317.
- 末次忠司, 栗城稔(1998) 改良した汜濫モデルによる汜濫流の再現と防災への応用に関する研究, 土木学会論文集, No.593/II-43, pp.41-50.
- 福岡捷二, 川島幹雄, 横山洋, 水口雅教(1998) 密集市街地の汜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, 土木学会論文集 No.600, pp.23-36.
- 重枝未玲, 秋山壽一郎, 浦勝, 有田由高(2001) 非構造格子を用いた有限体積法に基づく平面二次元洪水流数値モデル, 水工学論文集, 第45巻, pp.895-900.
- 川池健司, 井上和也, 林秀樹, 戸田圭一(2002) 都市域の汜濫解析モデルの開発, 土木学会論文集, No.698/II-58, pp.1-10.
- 安田浩保, 白土正美, 後藤智明, 山田正(2003) 水防活動の支援を目的とした高速演算が可能な浸水域予測モデルの開発, 土木学会論文集, No.740/II-64, pp.1-17.

数値解析法及びその他

- H.Takewaki, A.Nishiguchi and Yabe(1985) The Cubic-Interpolated Pseudo-Particle (CIP) method for solving hyperbolic-type equations, *J. Comput. Phys.*, 61, pp.261-268.
- Hirt, C. W.(1992) Volume-fraction techniques: powerful tools for wind engineering, *Journal of Wind engineering*, Vol.52, pp.333-344, 1992.
- 中山恵介, 佐藤圭洋, 堀川康志(1998) CIP法を用いた浅水流方程式の数値解析手法の開発, 水工学論文集, 第42巻, pp.1159-1164.
- T. Nakamura, R.Tanaka, T. Yabe, and K. Takizawa(2001) Exactly conservative semi-lagrangian scheme for multi-dimensional hyperbolic equations with directional splitting technique, *Journal of Computational Physics*, 174, 171-207.
- 内田龍彦, 河原能久, 山水綾, 渡辺豊, 森山学(2007.6): ヘリコプタに搭載した高精度3Dレーザスキャナによる河川の物理環境の計測, 河川技術論文集, Vol. 13, 243-248.

本解析法に関する既発表の論文

- 内田龍彦, 河原能久(2006.2): 任意の境界形状を有する二次元浅水流の高精度解析手法の開発, 水工学論文集, 第50巻, 799-804.
- 内田龍彦, 河原能久(2006.9): 二次元浅水流の保存型CIP陽解法の開発とその検証, 応用力学論文集, Vol.9, 917-924.
- 内田龍彦, 河原能久, 木梨行宏, 伊藤康(2007.2): デカルト座標系を用いた市街地汜濫流シミュレータの構築と竹原市の高潮汜濫への適用, 水工学論文集, 第51巻, 517-522.
- 内田龍彦, 見上哲章, 河原能久, 湧川勝己, 幸弘美(2007.6): 2004年10月出石川破堤汜濫における洪水の被害調査と汜濫流解析に基づく検討, 河川技術論文集, Vol. 13, 303-308.
- 内田龍彦, 伊藤康, 戎忠則, 河原能久 (2007.9): 破堤汜濫流に関する基礎的実験とその二次元数値解析, 応用力学論文集, Vol.10, 911-919.
- 河原能久, 内田龍彦, 木梨行宏(2007.10): 沿岸都市域における汜濫統合解析手法の開発, 海岸工学論文集, 第54巻, 1331-1335.

※ここでは本内容に関わる主要な参考文献と本解析法に関する既発表の論文のみ列挙している。
