

水災害対策支援のための高精度氾濫流シミュレータの開発



所属名：広島大学大学院工学研究科
発表者：内田 龍彦

1. はじめに

近年、日本各地において洪水、土砂、高潮災害が多発している。特に、平成16年には梅雨前線の停滞による新潟・福島豪雨、福井豪雨や相次ぐ台風の上陸によって甚大な被害を受け、世間の水災害に関する関心が高まった。平成17年、平成18年にも記録的な豪雨に見舞われている。今後地球温暖化によって水災害の危険性はさらに増加すると予測され、今後の水災害対策をどのように行うかが活発に議論されるようになり、ハード対策とソフト対策の連携をより一層強めて行くことが望まれている¹⁾。現状の治水施設が対応できる規模よりも大きい洪水や高潮に対しては、ソフト対策の重要性がさらに大きく、近年、数多くの破堤や高潮による氾濫シミュレータが開発されており、昨年度の本交流会においても実用例が報告されている²⁾。本研究では、建物群などの氾濫域の様々な地物情報を評価でき、家屋被害を含めて実績氾濫流の挙動解明や、水災害に強い街づくりに向けて具体的な減災対策を検討するための、高精度の氾濫流シミュレータを開発する。

2. 従来の氾濫流シミュレータ

洪水氾濫流に関するモデルには、外力モデルとして流出モデル、河川流モデルがあり、氾濫域のモデルとして、地表面流モデル、下水道などの地下空間モデルがあり、それぞれ開発が進められている。近年ではこれらのモデルを統合した、総合氾濫解析モデルが提案されている³⁾。高潮氾濫流では、外力モデルが異なるが氾濫域のモデルは同一である。本研究では、氾濫域のモデルの地表面流モデルの高精度化を目的としており、以下、本稿の氾濫解析は地表面流解析を指す。これまでに氾濫解析モデルは様々なものが提案されており、目的別に以下のように大別される。これまで主として、ハザードマップ作成のために広域氾濫解析⁴⁾が行われてきた。近年ではコンピュータ及び数値解析技術の進歩により、高精度/高解像度解析^{5),6)}や水防活動の支援を目的としたリアルタイム解析⁷⁾が可能になりつつある。ここで、高精度/高解像度解析とは、氾濫経路の詳細や個別家屋の被害を検討できるレベルのものを指す。このような解析では、破堤部付近では常流/射流、氾濫水のフロントではドライ/ウェット混在流れを扱う必要があり、高度な数値解析モデルが求められる。さらに、氾濫流解析において精度を向上させるためには、図-1に示すような解析に用いるデータ、即ち建物群などの氾濫域の複雑な地物情報を適切に評価することが重要となる。デカルト(x-y)座標系モデルでは、図-2に示すようになりに小さな格子(5m程度)を用いても建物群や道路網は表現できない。これらを表現するために、一般座標系モデル⁵⁾、非構造格子モデル⁶⁾、及び街路ネットワークモデル⁸⁾が提案されている。しかし、これらのモデルでは、建物群や道路網に合わせて計算格子を生成することが要求され、図-1に示すように特に計算に用いる数多くのパラメータが不規則に分布するため、計算データの整備は容易でない。氾濫解析デカルト座標系モデルに比べて計算データの整備の負荷が格段に大きくなるため、実用計算の多くは透過粗度係数を用いるなどして、各メッシュの平均的な抵抗を与えたデカルト座標系モデルが良く用いられる。本研究では、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る計算法を検討する。

3. 本氾濫流解析モデルの概略

3.1 特徴

一般に数値流体解析では、図-2のように空間を格子で細分化し、各格子の平均値の値が用いられる。これまでのモデルでは、都市構造に合わせて計算格子の形を生成することに主眼が置かれていた。しかし、計算格子が複数種の情報をもつようにすれば、計算格子の形とは異なる形が表現できる。即ち、各計算格子において、交点の値(点値、丸印)、x,y方向

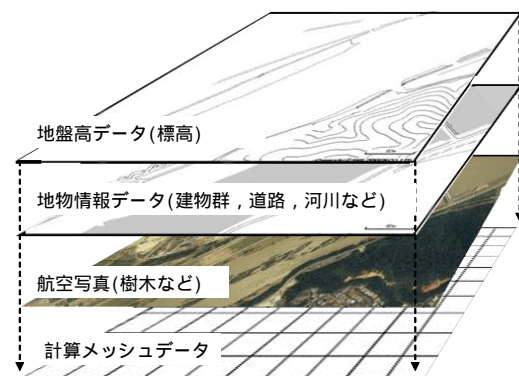


図-1 氾濫流解析における計算データ作成の例

の格子一辺にわたる平均値(線平均値, 太線の部分), 格子内にわたる平均値(面平均値, 色を塗った箇所)の情報を持たせると, 図-3に示すように, 都市構造の表現が, 従来のひとつの情報で表現する場合に比べて格段に改善される. 計算に必要なパラメータはひとつの格子について, 従来モデルではひとつであるのに対し, 本モデルでは上述の4種類のデータが要求されるため, 当然のことながら氾濫域データ整備の負荷は大きくなる. しかし, 適切な計算を行うために格子生成に数値解析技術が必要とする従来の一般座標系や非構造格子を用いたモデルに比べ, 本解析法では幾何学的に定義される4種類のデータを整備すればよい. したがって, 機械的な処理による計算データの作成が容易に行えるため, その負荷は従来法に比べて格段に小さいと考えている.

このような計算を行うため, 本研究ではCIP法⁹⁾を応用し, ひとつの計算格子に対して水深・流速の, 点値, 線平均値, 面平均値を連立して解く. ここで, CIP法⁹⁾とはひとつの計算格子に対して, 未知量の微分値や積分値を束縛条件として格子間の内挿関数を定義することによって, 移流項を安定かつ高精度に計算することができる新しい数値解法であり, 水工学の分野でもしばしば用いられている¹⁰⁾. しかし, 実用的な二次元浅水流解法, 特に氾濫流解析においてCIP法を適用するには, いくつかの課題が残されている. そのひとつは, 後述するダムブレイク問題において段波波高が適切に計算できず, 氾濫流のフロントを表現できないことである. もうひとつは, 安定な計算を行うために圧力(水深)解法に陰解法が採用されているため, 計算時間の負荷が他のモデルに比べて大きいことである. 本解析モデルでは, これらの課題を改善しつつ, 上述したように氾濫流に与える地盤高や建物群などの様々な条件の変化をデカルト座標系で表現することを目的とした解析モデルである.

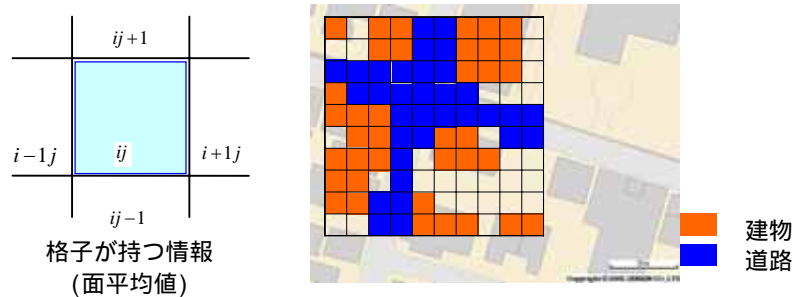


図-2 従来のデカルト座標系モデルにおける計算格子がもつ情報とそれにより表現される都市構造のイメージ

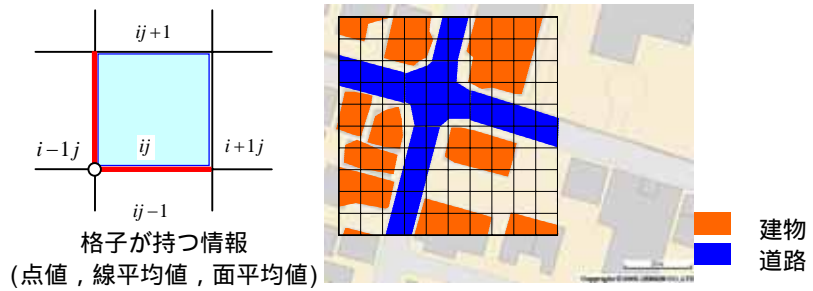


図-3 本解析モデルにおける計算格子がもつ情報とそれにより表現される都市構造のイメージ

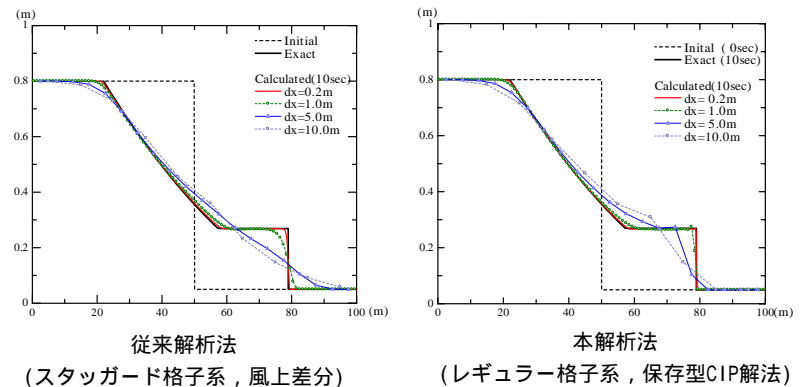


図-4 一次元ダムブレイク問題における従来解析法と本解析法の比較

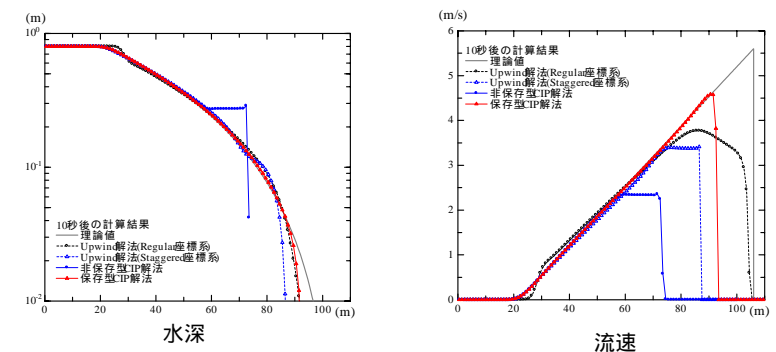


図-5 ドライベット上における種々の解析法の比較

3.2 検証

氾濫解析モデルの検証は直接的には実際に生じた氾濫実績と計算結果を比較により行える. しかし, 氾濫実績データは数値解析モデルの詳細を検討できるほど十分でない. このため, 氾濫解析モデルの検証は想定

する現象が計算できるかどうかを水理実験や数値実験を用いて検証される。本解析モデルは、種々の数値実験によって本モデルの性能を検証^{11),12)}されており、ここではその一部を示す。解析法やモデル検証の詳細は文献^{11),12)}を参照にされたい。

浅水流解法の検討によく用いられているダムブレイク問題の検証を示す。図-4は従来の汎用解析によく用いられている解析法(スタガード格子系の風上解法)と本解析法(保存型CIP解法)の比較である。ダムブレイク問題では、ゲートの急開により、正の段波と負の段波が図-4のように伝達する。スタガード格子系の風上解法では、段波先端部を表現するためにおよそ7点の格子点数が必要である。したがって、計算格子点数が少なくなると表現できなくなり、段波先端位置は格子が粗くなるほど前進する。これに対し、本解析法では、正の段波を必要最低限の2点で表現しており、格子が大きくなっても先端をぼかすことなく適切に計算できることが示される。図-5は、ドライベット上におけるダムブレイク問題における種々の計算方法の比較である。非保存型CIP解法ではドライベットであっても段波先端部で高い波高が形成される。これは、水工学の分野でこれまで行われてきたCIP法を用いた計算結果¹⁰⁾と同様である。本解析法(保存型CIP解法)は、他の方法に比べ、より小さな水深まで理論値の流速分布と一致しており、理論値の水深分布を先端部極近傍まで表現している。底面がnon-slip条件であれば微小な水深で高速流が流れることは無いため、極先端部付近の本解析法の誤差は実用問題においては問題にならないと考えられる。

次に、図-2、図-3に示したような汎用域の街路網の評価について、本解析法の妥当性を検証する。ここでは、図-6(a)のように十字路を有する街路(隙間)を二種類設け、それぞれにおいて上流端水位一定の条件でダムブレイク計算を種々の大きさの計算格子で行う。ここでは、条件を単純化するため街路以外に水は流れないこととしている。街路幅は10.0 mであり、用いた計算格子は $dx=dy=\Delta=1.0, 5.0, 10.0, 20.0$ mである。 $\Delta=1.0$ mは街路幅10.0 mの1/10のスケールであり、街路形状を十分表現できる条件である。これに対して、 $\Delta=5.0$ mは、街路格子が連続的に存在できる最大の大きさであり、図-2、図-3に示したイメージに近い条件である。それより大きい $\Delta=10.0$ mでは街路格子が連続的に存在できず、 $\Delta=20.0$ mではもはや街路格子自体が存在できない。したがって、これらの条件では従来解析では基本的に街路に汎用流が流れないことになる。図-6(b)に、それぞれの条件において断面I、断面IIを通過する汎用流量の時間変化の比較を示す。 $\Delta=5.0$ mの計算結果は、いずれの条件においても、 $\Delta=1.0$ mの計算結果とほぼ一致していることから、本解析モデルでは図-2、図-3に示すような街路格子の半分のスケールで街路を流れる非定常の汎用流が精度よく計算できる。それよりも粗い $\Delta=10.0, 20.0$ mの場合、条件によっては小さい計算格子との差が見られるものの、その差は小さく、計算格子よりも小さい街路を流れる汎用流も表現できている。

以上のことから、各計算格子の点値、線・面平均値を同時に解くことによって、汎用流の遷移部や汎用域の複雑な街路網を精度良く捕らえることができることが示された。市街地の汎用流は道路に沿って汎用流が伝達することが知られている。本モデルでは、街路格子の半分のスケールで街路を流れる非定常の汎用流が精度よく計算でき、格子幅よりも小さい街路の汎用流を表現できることから、市街地汎用流解析においては主要道路幅の半分程度の格子スケールであれば、十分な精度で計算可能であると考えられる。

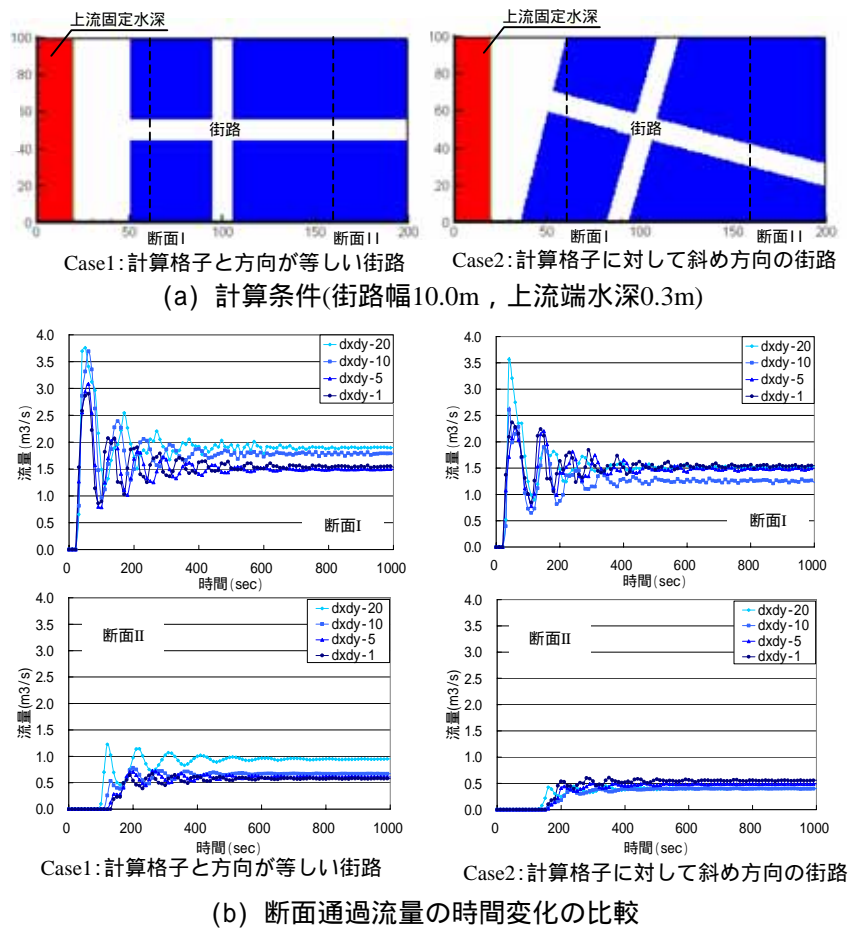


図-6 本解析モデルの街路評価の検証

4. 台風0418による竹原市高潮 氾濫流解析への適用

4.1 概略

広島県は、平成16年8月30日に台風16号、翌月9月7日には台風18号の高潮被害を連続して被った。両台風により県内随所の海岸保全施設が越波や波浪により破損し、瀬戸内沿岸及び島諸群の各地で浸水被害を受けた。ここでは、台風16号時に県内最大の浸水被害を受けた竹原地区を対象として、構築した解析法を用いた氾濫解析事例を紹介する。

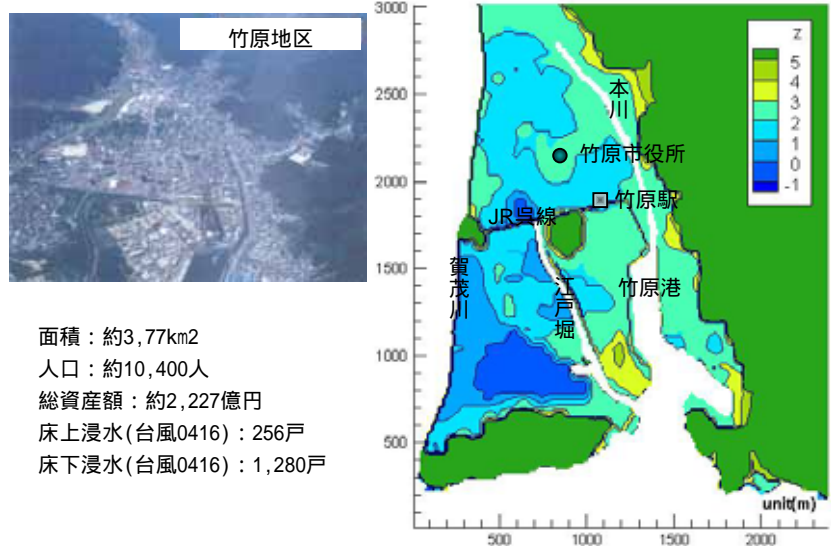


図-7 台風0416による竹原地区の浸水被害概要¹³⁾と地盤高

4.2 被害概要と解析方法

竹原地区の解析対象区域の面積は約3,77km²で同区域内に約10,400人が居住している。二級河川賀茂川の堤防と山地に囲まれた地区で、竹原市の中心市街地となっており、地区を二級河川本川、江戸堀が貫流している。図-7に台風0416による竹原地区の浸水被害概要と地盤高コンターを示す。標高3m以下（竹原港既往最高潮位2.97 T.P.m）の低地部が地区面積の約76%を占め、市街地は沿岸部に比べ地盤が低く、氾濫水が広がりやすい地形特性である。また同地区内の人口の約8割が標高3m以下の低地部に集中しており、高潮氾濫による被害ポテンシャルが非常に高い

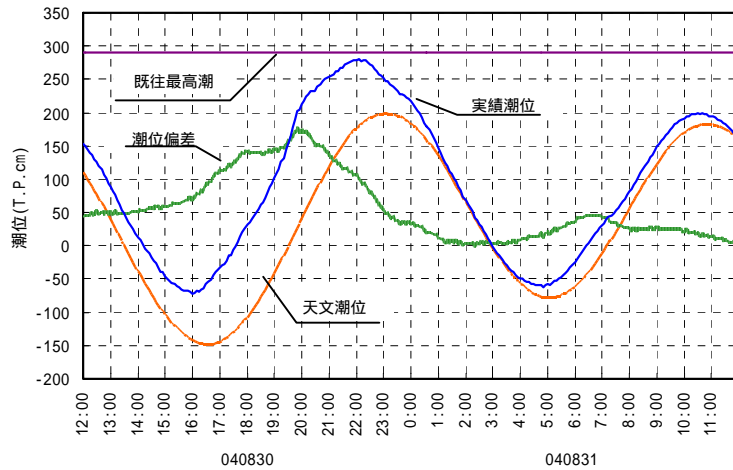


図-8 台風0416による竹原港の潮位変化

と言える。また、竹原地区には、高潮氾濫時の大人数避難場所が確保できない事、江戸堀の堤防の老朽化などが、高潮氾濫に対する問題点として挙げられる。平成16年台風16号時には1536棟浸水した¹³⁾。

図-8に平成16年8月30日台風16号時の竹原港潮位を示す。竹原港の潮位変動を海全体に与え、賀茂川・本川・江戸堀は解析せずに静水として扱い、これらの水位は竹原港潮位と等しくした。計算時間は、最低堤防高が2.10mであることから、30日19:50時2.02m~31日1:35時1.01mとした。また、考慮する浸水形態は、越流のみの浸水とし、越波、排水管からの海水逆流、内水氾濫は考慮しない。計算条件は、計算格子を主要街路と同程度の幅である、 $dx=dy=12.5m$ と設定し、それにより計算格子数46,899個（193×243）、計算時間刻み $dt=0.1s$ である。

4.3 解析結果と考察

平成16年台風16号による竹原地区高潮氾濫の最大浸水深の解析結果を図-9に、氾濫実績を図-10¹³⁾に示す。図-10の網掛けの部分が浸水域である。沿岸部や市街地の一部で解析結果と実績はやや異なる。浸水形態には、越波越流による浸水、排水管からの海水の逆流による浸水と報告されている。解析モデルの問題点として、越波や排水管による海水の逆流を本解析モデルで評価できていないことが挙げられるが、これが実績との差となっているかどうかは定かでない。現状のデータ状況では解析結果の妥当性を詳しく検証することが難しいが、主要な氾濫区域とその範囲は概ね再現できていると言えよう。したがって、ここでは、上述のように解析モデルには問題点が残されているが、図-9と図-10の比較から今回対象とした高潮氾濫流に関しては解析結果の問題は大きくないとして、竹原中心街付近を含む区域Aと氾濫被害の大きい区域Bについて、以下考察する。

図-11に、図-10に示した区域Aと区域Bにおける浸水領域拡大の様子を示す。区域Bでは最高潮位到達時に

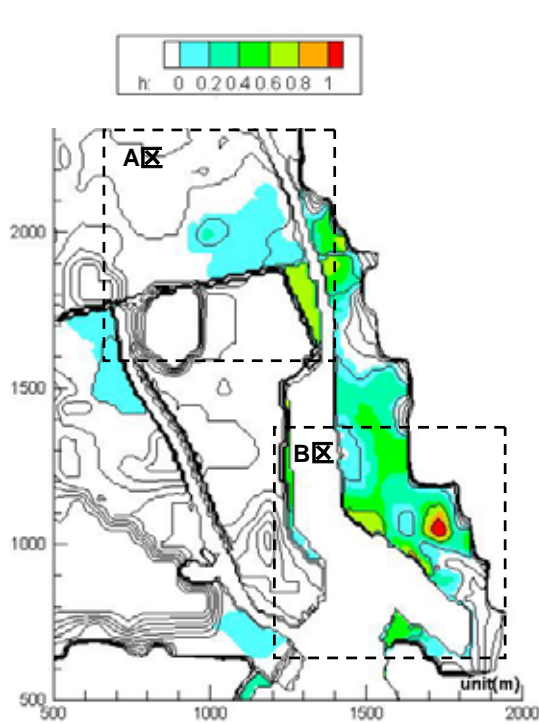


図-9 台風0416による高潮氾濫解析結果

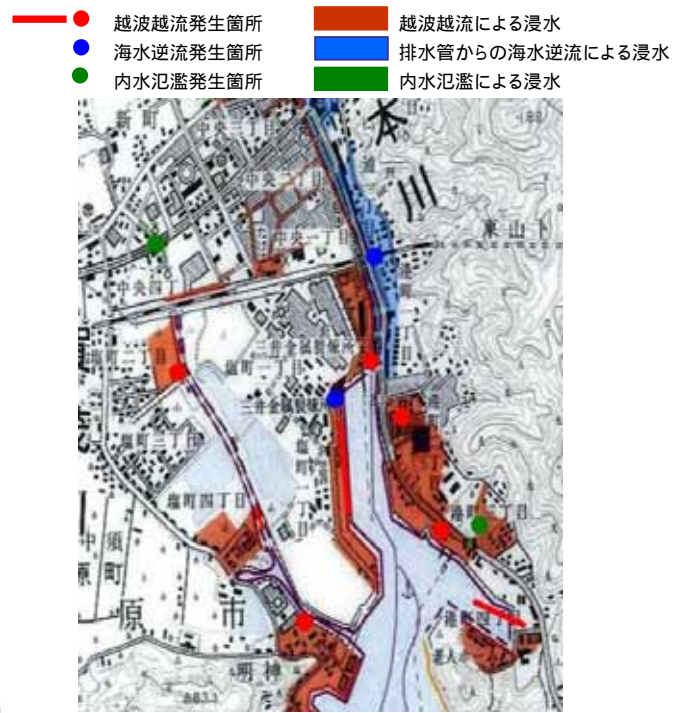


図-10 台風0416による高潮氾濫実績¹³⁾

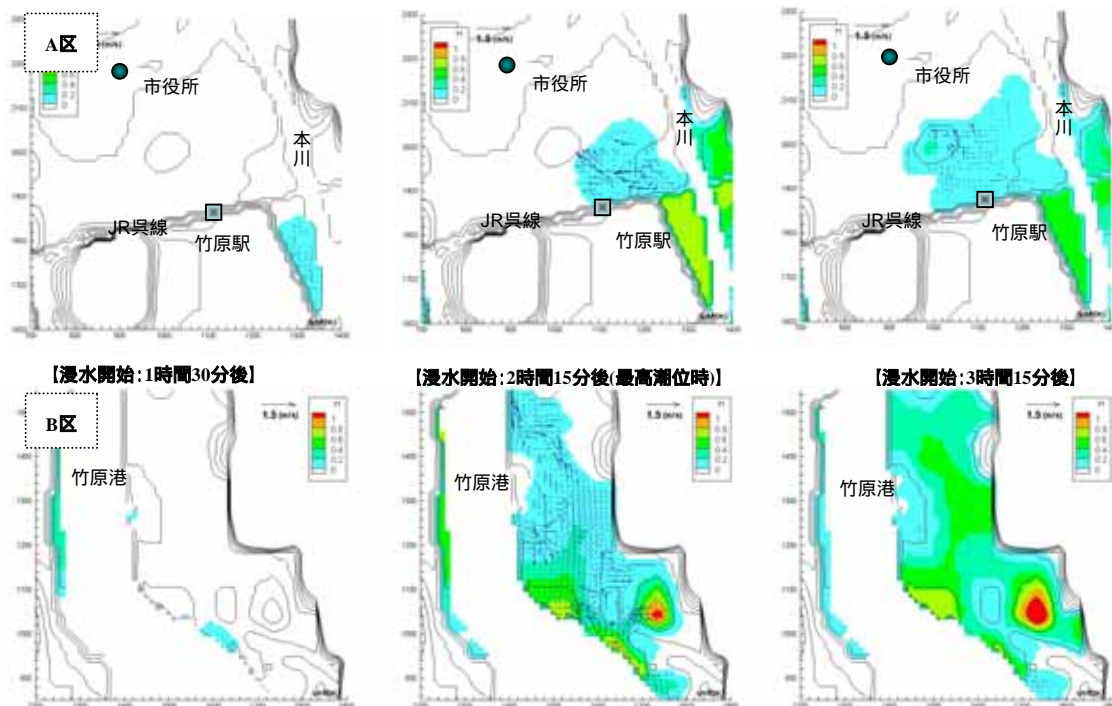


図-11 高潮氾濫解析による浸水領域拡大の様子

本川左岸の堤防の低い箇所から多量の氾濫水が流入し、本川と左岸側の山地に囲まれた低平地のほとんどが浸水している。本川から離れた箇所に地盤が低くなっている箇所がいくつもあり、氾濫被害を軽減するためには、流入する氾濫水を小さくすることが肝要である。区域Aでは、JR線の南の本川左岸沿いから氾濫水が流入するが、JR線の盛土に遮られ氾濫水はあまり広がっていない。図-7より明らかなように、区域Aを含む市街地中心部では低平地が広く広がっており、氾濫水が広がりやすい地形特性ではあるが、今回の高潮では流入する氾濫水が小さかったために、氾濫領域が広がらなかったと言える。図-8より台風16号時の竹原港最高潮位は2.80T.P.mであり、既往最高潮位2.97T.P.mを越えなかった。これは潮位偏差と天文潮位の位相が大きくずれていたことが幸いした。仮に両者の位相が重なっていれば、最高潮位は今回の災害よりも最高潮位が1.0 m近く上昇していたことが予測される。この場合、竹原市中心街は本川左岸から多量の氾濫水が流入

し、甚大な高潮被害氾濫を受ける危険性が高い。したがって、本川左岸の高潮堤防の嵩上げとともに、氾濫流の経路から氾濫水が広がらないように道路整備を行うなどの内地の整備を同時に進めることが望まれる。

5. まとめと今後の課題

本研究では、高精度氾濫流解析モデル構築のために、複雑な都市構造をデカルト座標系で表現するため、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新しい氾濫流解析モデルを提案した。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、かつ陽解法でありながら、常・射流、ドライ・ウェット混在の厳しい流れに適用可能であることを示した。基礎方程式中のパラメータにも分布を与えることが出来るため、街路網などの氾濫域の複雑な地物情報を捉えることができることを示した。数値実験による検証から、市街地氾濫流を扱う場合、主要道路幅の半分程度の格子スケールであれば、氾濫水の挙動を高精度で計算できることが示唆された。そして、本解析モデルを竹原市の高潮氾濫解析に適用し、竹原市の高潮氾濫に対する問題点を考察した。竹原地区では、中心街が広い低平地に位置することから、高潮氾濫対策のためには高潮堤防の嵩上げとともに、氾濫流の経路から氾濫水が広がらないように内地の整備を同時に進めることが必要である。このような対策を行うためには精度の高い氾濫流解析が不可欠であり、そのためには排水を含めた高精度の解析モデルの構築とともに詳細な氾濫域のデータを整備することが望まれる。

参考文献

- 1) 例えば、辻本哲郎 編：豪雨・洪水災害の減災に向けて、技報堂出版、2006。
- 2) 例えば、西畑剛：津波・高潮防災技術について、平成17年度中国地方建設技術開発交流会、pp.8-11、2005。
- 3) 兪朝夫、末次忠司：流域管理の視点からの都市域の水防災、河川技術論文集、第10巻、pp.1-6、2004。
- 4) 建設省土木研究所 河川部都市河川研究室：氾濫シミュレーション・マニュアル(案)-シミュレーションの手引き及び新モデルの検証-、土木研究所資料第3400号、1996。
- 5) 福岡捷二、川島幹雄、横山洋、水口雅教：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、土木学会論文集No.600、pp.23-36、1998。
- 6) 重枝未玲、秋山壽一郎、浦勝、有田由高：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、2001。
- 7) 安田浩保、白土正美、後藤智明、山田正：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、2003。
- 8) 川池健司、井上和也、林秀樹、戸田圭一：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、pp.1-10、2002。
- 9) 矢部孝、内海隆行、尾形陽一 共著：CIP法、森北出版、2003。
- 10) 例えば、中山恵介、佐藤圭洋、堀川康志：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、1998。
- 11) 内田龍彦、河原能久：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、pp.799-804、2006。
- 12) 内田龍彦、河原能久：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、2006、印刷中。
- 13) 高潮浸水被害防止緊急調査検討委員会：検討委員会資料、2005。