

# デカルト座標系を用いた市街地氾濫流シミュレータの構築と竹原市の高潮氾濫への適用

A HIGH-RESOLUTION SIMULATOR FOR INUNDATION FLOWS IN URBAN DISTRICTS AND ITS APPLICATION TO TAKEHARA CITY DUE TO STORM SURGE

内田龍彦<sup>1</sup>・河原能久<sup>2</sup>・木梨行宏<sup>3</sup>・伊藤康<sup>3</sup>

Tatsuhiko UCHIDA, Yoshihisa KAWAHARA, Yasushi ITO and Yukihiko KINASHI

<sup>1</sup>正会員 博(工) 広島大学助手 大学院工学研究科 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

<sup>2</sup>フェロー会員 工博 広島大学教授 大学院工学研究科 (同上)

<sup>3</sup>学生会員 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻 (同上)

We have developed a numerical model for inundation flows in urban districts, which can capture the complex geometries on the Cartesian coordinate system by utilizations of multi-valubles on a computational cell based on the CIP scheme. This paper presents the numerical examination to consider computational methods for flows through road networks in urban districts and demonstrates the adequacy of the model. Then we present the application of the model to the inundation flow in Takehara City due to the storm surge by the typhoon 0416 on August 30-31, 2004. As a result of comparing a calculation result with flood records and damage photographs, flood area could be reproduced by introducing the shielding ratio of flood water by buildings. Then, we considered characteristics of the city for the inundation flow due to storm surge disasters based on the computational results.

**Key Words:** *Shallow water flow, inundation flow, Cartesian coordinate system, distributions in a computational cell, point and line- and area- averaged values, storm surge*

## 1. 序論

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た. 広島県においても, 平成16年8月30日に台風16号, 翌月9月7日に台風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するとともに, 瀬戸内沿岸及び島嶼の各地で浸水被害を受けた. これらの一連の水災害により, 現存の水防災施設の課題や氾濫地域の社会的脆弱性等が明らかとなった. 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, ハード対策とソフト対策の連携をより一層強め, 被害の最小化を図ることが望まれている<sup>1)</sup>. 現状の防災施設で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増し, このために信頼性, 実用性の高い氾濫解析法の構築が求められる.

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, 河川流モデル等, 氾濫域のモデルとして, 地表面流モデル, 下水道流モデル等があり, 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<sup>2)</sup>. 本研究では, 氾濫域のモデルの地表面流モデルの解析法の検討を目的としており, 以下, 本論文において氾濫解析は地表面流解析を指す. 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<sup>3)</sup>が行われてきたが, 近年では数値解析技術及びコンピュータ技術の進歩により, 氾濫経路の詳細や個別家屋の被害を検討することを目的とした高精度解析<sup>4),5)</sup>や水防活動の支援を目的としたリアルタイム解析<sup>6)</sup>が可能になりつつある. 氾濫流解析において精度を向上させるためには, 建物群や道路などの氾濫域の地物情報を適切に評価することが重要となる. デカルト座標系モデルでは, 図-1(a)に示すように標準の氾濫解析で用いられる格子サイズ(50 m)に比べてかなり小さな格子を用いても建物群や道路網の形状は表現できない. これら表現するために, 一般座標系モデル<sup>4)</sup>, 非構造格子モデル<sup>5)</sup>などの境界適合座標系モデルや, 市街地氾濫流が道路網を流れることに着目した街路ネットワークモデル<sup>7)</sup>が提案されている. しかし,

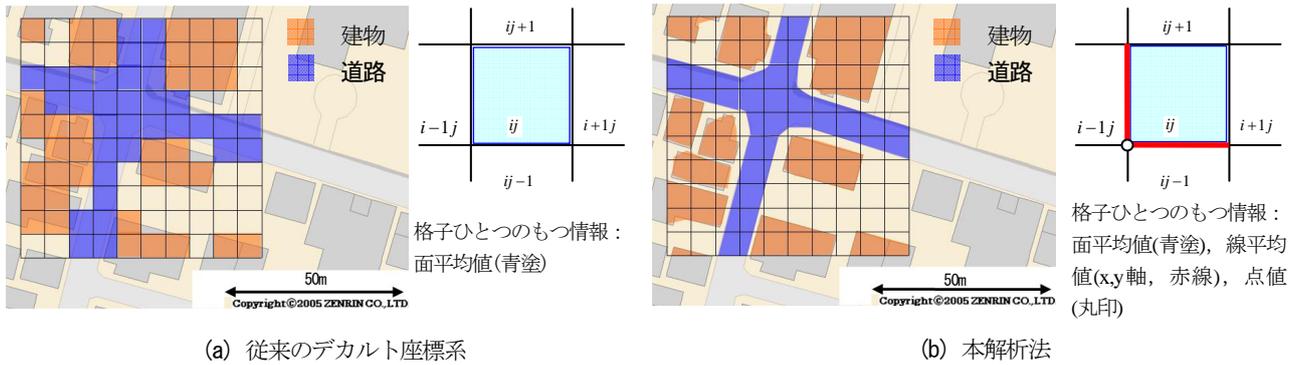


図-1 デカルト座標系において計算格子のもつ情報を増やした本解析法の都市構造の表現イメージ

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るため、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、実用計算では等価粗度係数<sup>3)</sup>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ようである。

このため、著者らはこれまでデカルト座標系で都市構造を表現するための汎用解析モデルの構築を目的とし、基礎的なベンチマークテストを通じて解析法の検討を行ってきた<sup>8),9)</sup>。本研究では、実用計算のために市街地構造の評価法についてさらに検討を行い、台風16号時に広島県内最大の浸水被害を受けた竹原市の汎用状況の再現、高潮対策の検討を目的とする。

## 2. 汎用解析モデルと都市構造の評価法の検討

### (1) 基礎方程式

本研究では、建物群などによる汎用水の遮断を考慮するため、コントロールボリュームにおいて、不透過の鉛直壁に囲まれた領域を考え、FAVOR法<sup>10)</sup>に基づいて流体占有率を考慮した以下の二次元浅水流方程式を基礎方程式とする。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{V} \frac{\partial A_j u_j h}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{Vh} \left( V \frac{\partial u_i h}{\partial t} + \frac{\partial A_j u_i u_j h}{\partial x_j} \right) = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x_i} - \frac{\tau_{0i}}{h} - \frac{f_i}{h} + \frac{1}{Vh} \frac{\partial A_j h \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

ここに、添え字 $i, j$ は総和規約に従い、1, 2はそれぞれ $x, y$ 方向を表す。添え字 $l, m$ と等しいが、総和規約には従わないものとする。また、 $h$ は水深、 $u_i$ は $i$ 方向流速、 $\zeta = z + h$  ( $z$ : 鉛直方向) であり、 $A_i, V$ は $i$ 方向断面と計算格子の流体占有率(空隙率)である。 $\tau_{0i}$ は底面せん断応力であり、マンニングの粗度係数 $n$ を用いて与える。 $\tau_{ij}$ は水平せん断応力であり、渦粘性係数 $\nu_t$ は $1/6 \kappa u_* h$ にスマゴリンスキー

モデルによる渦動粘性係数が加えられたものが用いられている<sup>11)</sup>。 $f_i$ は計算で直接表現できない境界形状による抵抗<sup>12)</sup>であり、汎用流解析においては家屋に作用する流体力等が考えられるが、本論文では0としている。

### (2) 数値解析法

一般に数値流体解析では、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<sup>4),5)</sup>。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)、 $x, y$ 方向の格子一辺にわたる平均値(線平均値、赤線の部分)、格子内にわたる平均値(面平均値、青色を塗った箇所)の情報を持たせると、図-1(b)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1つであるのに対し、本モデルでは上述の3種類4つのデータが要求されるため、当然のことながら汎用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を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データを整備すればよいと、機械的な処理による計算データの作成が容易に行え、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、本研究では近年提案されたCIP法<sup>13)</sup>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とにより、各格子で複数種定義されたパラメータを直接考慮した計算を可能としている<sup>8),9)</sup>。また、実用的な二次元浅水流解法、特に汎用流解析に適用するため、従来のCIP法の課題であったダムブレイク問題において段波波高や汎用流のフロント部分が適切に計算できるように改善され、圧力(水深)解法には陽解法が採用されている<sup>9)</sup>。本解析手法および検証の詳細は、文献<sup>8),9)</sup>を参照にされた

### (3) 道路網の評価法の検討

図-1に示したような氾濫構造の評価法について検討する。ここでは、図-2のように十字路を有する街路(隙間)を、座標系の方向と等しい場合(Case A)と異なる場合(Case B)の二種類設け、それぞれにおいて上流端水深一定( $h=0.3$  m)、道路下流端自由流出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。条件を単純化するため、河床は平坦かつ街路以外に水は流れないこととする。また、ここでは上流端水深 $h=0.3$  mの結果を示すが、異なる $h$ に対しても以下と同様の特徴をもつ結果が得られた。街路形状は基礎方程式(1),(2)で定義された流体占有率で評価される。計算条件を表-1に示す。ここで、相対格子幅 $D/B$ は街路幅 $B(=10.0$  m)に対する計算格子の大きさ $dx=dy=A(=1.0, 5.0, 10.0, 20.0$  m)である。 $D/B=0.1$ では街路網を十分表現できる条件である。これに対して、 $D/B=0.5$ は、道路格子(計算格子が道路のみを示し、壁面を含まない)が連続的に存在できる最大の大きさであり、図-1とほぼ同等の条件である。それより大きい $D/B=1.0$ ではもはや道路格子が存在できず、すべての格子に壁面が含まれる。 $D/B=2.0$ では、すべての格子で壁面の占有率が半分以上となる。これらの条件では、従来のデカルト座標系解析では街路に氾濫水が流れないことになる。

図-3に、それぞれの条件において断面U、断面Dを通過する氾濫流量 $Q_U, Q_D$ の時間変化の比較を示す。図-3には、比較のため従来のデカルト座標系解析法(ここでは本解析法を用い、流体占有率は0.5を境に1.0と0.0を与えている)の結果も示している。いずれのCaseにおいても、特に断面Uにおいて流量が振動するが、これは上流端壁面からの反射による上流水深の振動によるためである。Case Bにおいて従来法では $D/B=0.5$ となると街路を流れる流量が極端に減少する。一方、本解析法では街路網の方向と計算座標軸の方向による差は小さく、流体占有率を適切に考慮することにより、本解析モデルは任意の方向の街路網を表現できることが分かる。 $D/B=0.5, 1.0$ の計算結果は、計算初期の非定常性が大きい条件においても、 $D/B=0.1$ の計算結果とほぼ一致していることから、本解析モデルでは道路幅と同程度の計算格子であれば、街路網を流れる非定常の氾濫水が精度よく計算できると言える。なお、これらの条件において、水深、流速の時間変化を比較したところ、同様に $D/B=0.5, 1.0$ と $D/B=0.1$ の計算結果はほぼ一致していることを確認している。計算格子が道路幅よりも大きくなる $D/B=2.0$ では、小さい計算格子との差が見られるものの、計算格子よりも小さい街路を流れる氾濫流も表現できることが分かる。

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、従来法と比較して氾濫域の複雑な街路網を精度良く捉えることができることが示された。市街地の氾濫流は道路に沿って氾濫流が伝搬することが知られている。本モデルでは、道路幅と同程度のス

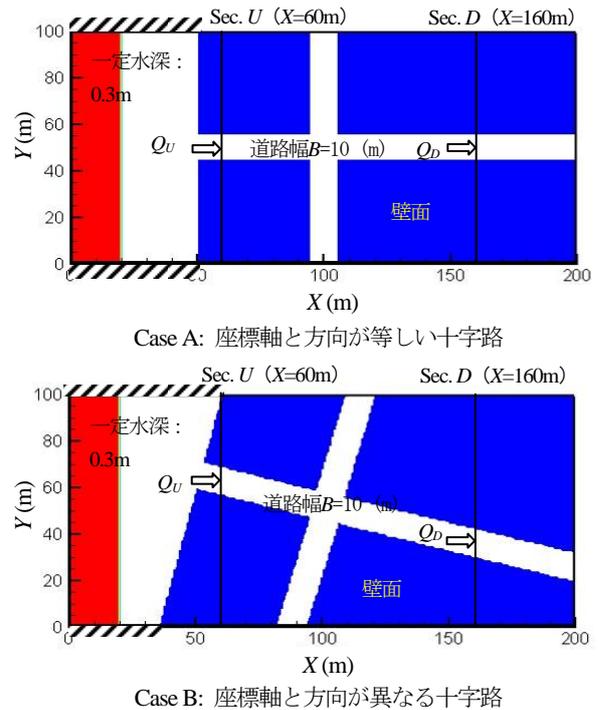


図-2 市街地街路網評価法の検討のための数値実験

表-1 計算条件

| 格子幅<br>$A=dx=dy$ | 道路幅<br>$B$ | 相対格子幅<br>$D/B$ |
|------------------|------------|----------------|
| 1.0 m            | 10 m       | 0.1            |
| 5.0 m            |            | 0.5            |
| 10 m             |            | 1.0            |
| 20 m             |            | 2.0            |

ケールで街路を流れる非定常の氾濫水が精度よく計算でき、格子幅よりも小さい街路の氾濫流を表現できることから、実用上の市街地氾濫流解析においては主要道路幅の程度の格子スケールであればある程度の精度で計算可能であると考えられ、これがひとつの計算条件の基準となることが明らかとなった。

## 4. 台風0418による竹原市高潮氾濫流解析

### (1) 竹原市の被害概要

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市を対象とする。

解析対象区域の面積は約3.77km<sup>2</sup>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-4に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

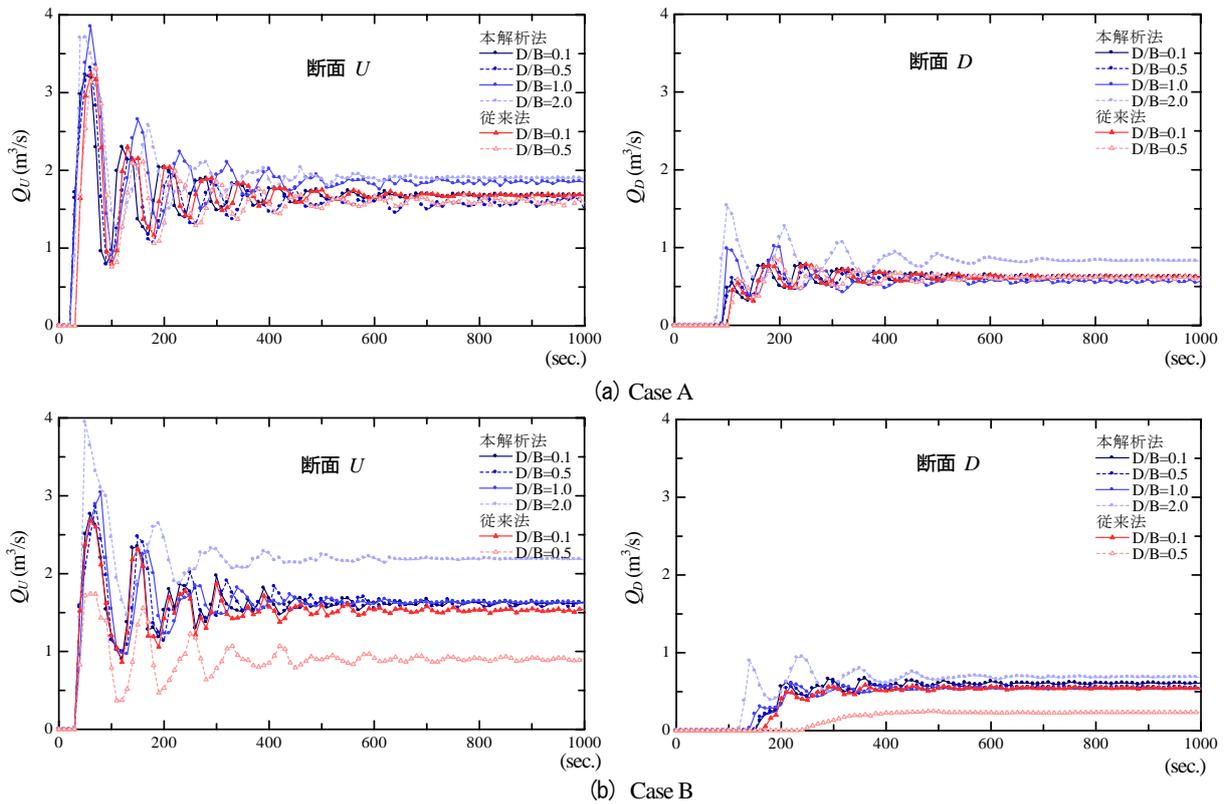


図-3 種々の計算格子の大きさに対する街路網通過流量の時間変化の比較

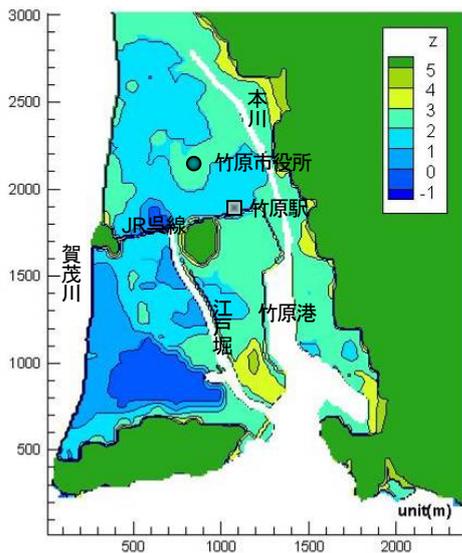


図-4 竹原市の地盤高

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、本川の堤防高は2.7~2.8mと堤防高不足などが、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<sup>14)</sup>。

台風16号は中心気圧970hPaであり、竹原観測所で最大降水量45.5mm/時を記録する非常に強い雨が特徴の台風であった。図-5に台風0416号時の竹原港潮位変動を示す。最大潮位は8月30日深夜22時に2.80T.P.mを記録した。これは既往最高潮位を超えていないが、天文潮位と潮位変

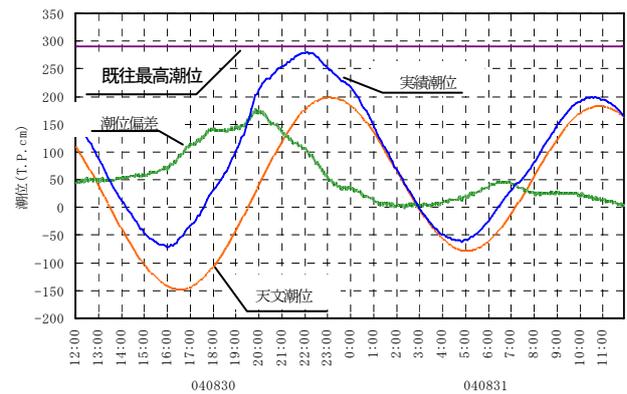


図-5 台風0416による竹原港の潮位変化<sup>14)</sup>

動が一致していれば、後述するように既往最高を超え被害はさらに大きかったと予想される。

## (2) 解析条件設定

計算格子の大きさは、前節の計算結果を受けて、計算地区の主要道路幅を参考に、 $\Delta x = \Delta y = 12.5\text{m}$ と設定した。それにより計算格子数46,899個(193×243)、計算時間刻み $dt = 0.1\text{ sec.}$ である。本解析モデルは格子内の分布を考慮することによって地盤の起伏状況を精度良く取り込むことが出来る<sup>9)</sup>が、ここでは、地盤高データは国土地理院の数値地図50mメッシュのデータを内挿して作成されている。計算で対象とする竹原市街地は地盤の起伏が小さいが、本研究の目的とする高精度解析のためにはより詳細な地盤高データの整備が必要である。即ち、本解析モデルは高密度データが存在する場合において、より適している。高密度データの取得、計算データへの変換

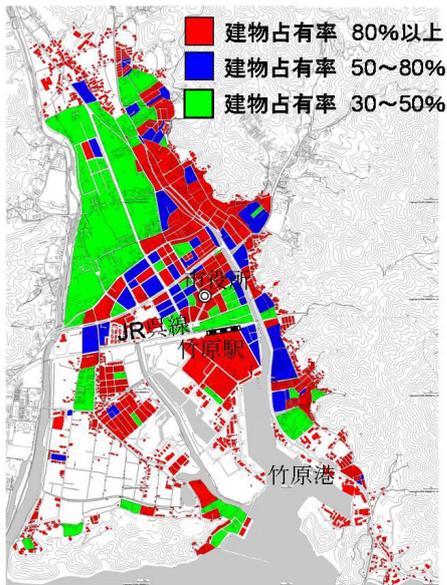


図-6 区画内の平均的な建物占有率の色分け表示

方法の構築については今後の課題としている。氾濫域の地物データは個別の建物を扱うのではなく、道路で区切られた区画内の平均的な建物の占有率で表現することにする。まず、地図上で区画内建物占有率が80%以上、50~80%、30~50%の場合に場合分けする。そのあと、地図上に12.5m×12.5mメッシュを掛け、各メッシュについて区画内建物占有率が80%以上のとき建物占有率を $\theta=0.8$ とし、50~80%の場合を $\theta=0.5$ 、30~50%の場合 $\theta=0.3$ とする。また10%以下の場合、区画として取り扱わず、建物自体を取り扱う。図-6に作成した区画内建物占有率を示す。各計算格子における流体占有率の点値、線平均値、面平均値は、図-6の画像処理により求める。

底面粗度係数は、合成粗度係数式<sup>3)</sup>を用いて算出する。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。これら海面からの流入および流出量は、堤防高から越流公式<sup>15)</sup>により算出した。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、内水氾濫は考慮していない。

### (3) 解析条件結果と考察

図-7に平成16年台風16号による竹原地区高潮氾濫の(a)実績<sup>14)</sup>、(b)建物占有率を考慮しない場合、及び(c)考慮した場合の最大浸水深の解析結果を示す。また、図-8に解析結果による氾濫面積の時間変化を示す。建物占有率を考慮しない場合、氾濫実績に比べて竹原駅周辺などでやや氾濫面積が小さい。建物占有率を考慮した場合は、考慮しない場合よりも氾濫面積が大きくなり、実績の再現性が良くなっている。このことから、市街地氾濫解析においては、建物占有率を考慮する必要がある。沿岸部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おり、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。また、図-9にも示すように氾濫水の伝達の様子やブラックスペクトルから、道路に集中した流れは顕著でない。これは、今回の解析では流体占有率を区画平均値で与えているため、区画内の建物群の抵抗が表現されていないためである。この抵抗の適切な与え方については、今後水理実験や詳しい氾濫実績データを用いて検討する必要がある。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。

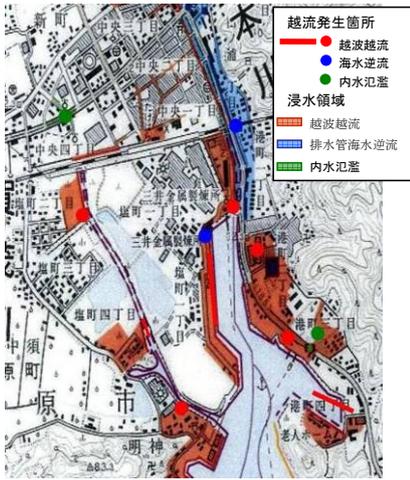
図-9は竹原中心街付近における浸水領域拡大の様子である。JR線の南の本川右岸沿いから氾濫水が流入するが、JR線の盛土に遮られ氾濫水はあまり広がっていない。

図-4より明らかなように、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こととJR線の盛土により、氾濫領域が広がらなかった。図-5に示したように、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。これには潮位偏差と天文潮位の位相が大きすぎていたことが幸いした。仮に両者の位相が重なっていたら、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になる。この場合を想定して解析すると、本川右岸から多量の氾濫水が流入し、竹原市街全域において、浸水深が1.5m以上となる甚大な高潮被害氾濫を受ける結果が得られている。したがって、少なくとも竹原市中心街の高潮被害を軽減するために、本川右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。

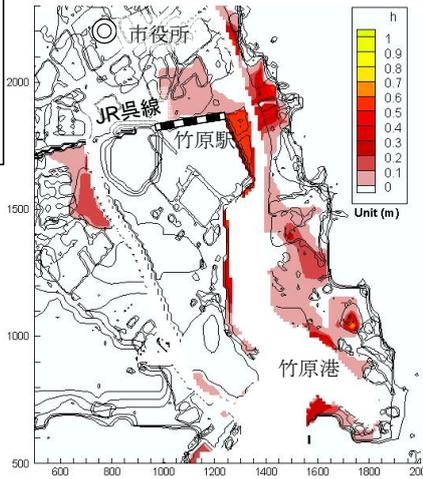
## 5. 結論

本研究では、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による都市構造の評価方法について検証した。そしてH16の台風16号時による竹原市高潮氾濫流解析に適用し、氾濫状況の再現性と高潮対策の検討を行った。以下に本研究で得られた主要な結論を示す。

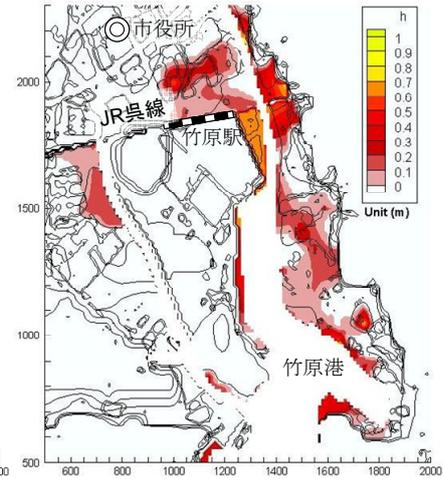
- 1) 流体占有率の格子内分布を表現することにより、デカルト座標系においても街路網などの氾濫域の複雑な地物情報を捉えることができることを明らかにした。数値実験による検証から、市街地氾濫流を扱う場合、主要道路幅の格子スケールであれば、氾濫水の挙動を計算できることが示唆された。
- 2) 竹原地区では、中心街が広い低平地に位置すること



(a) 竹原市高潮氾濫実績<sup>14)</sup>



(b) 建物占有率無



(c) 建物占有率有

図-7 台風0416による竹原市高潮氾濫実績<sup>14)</sup>と最大浸水深の計算結果の比較

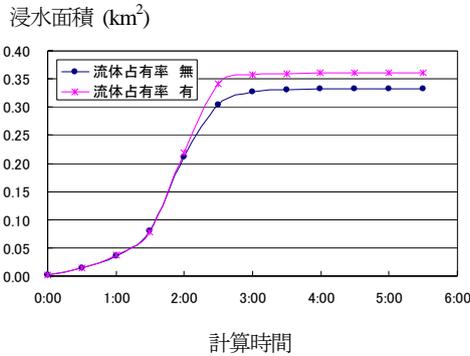
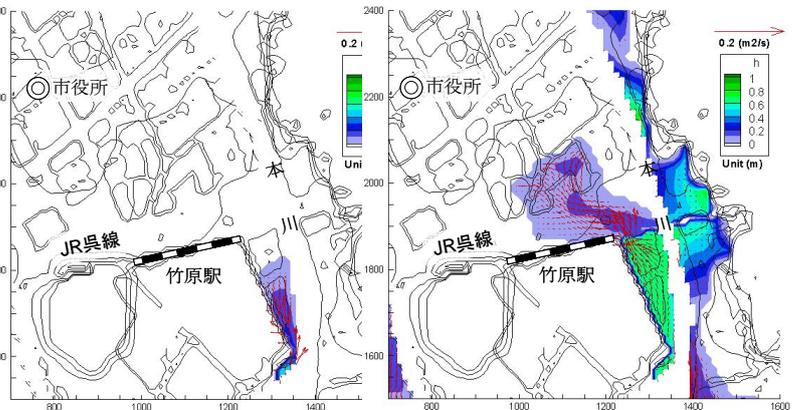


図-8 建物占有率による浸水面積の伝達の比較



(a) 浸水開始1時間後(8/30 20:50)

(b) 最高潮位時(8/30 22:00)

図-9 竹原市中心部付近の浸水面積の伝達様子

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、そのためには解析モデルの高度化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) 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。
- 3) 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。
- 4) 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、pp23-36、1998。
- 5) 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数値モデル、水工学論文集、第45巻、pp.895-900、2001。
- 6) 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。

- 7) 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。
- 8) 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。
- 9) 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、pp.917-924、2006。
- 10) Hirt, C. W.: Volume-fraction techniques: powerful tools for wind engineering, Journal of Wind engineering, Vol.52, pp.333-344, 1992。
- 11) 渡辺明英、福岡捷二、Alex George Mutasingwa、太田勝：複断面蛇行河道におけるハイドログラフの変形と河道内貯留の非定常2次元解析、水工学論文集、第46巻、pp.75-80、2002。
- 12) 内田龍彦、福岡捷二：流れによる護床ブロック群の変形・破壊の解析、水工学論文集、第49巻、pp.793-798、2005。
- 13) T. Nakamura, R. Tanaka, T. Yabe, and K. Takizawa: Exactly Conservative Semi-Lagrangian Scheme for Multi-dimensional Hyperbolic Equations with Directional Splitting Technique, Journal of Computational Physics 174, 171- 207, 2001。
- 14) 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。
- 15) 土木学会編：水理公式集、丸善、pp.125-133、1999。

(2006. 9. 30受付)