

# 浸水被害予測技術の現状と課題

## ON THE INUNDATION PREDICTION, PRESENT STATE AND MATTERS TO BE RESOLVED

天口英雄<sup>1,2</sup>・椿 涼太<sup>1,3</sup>

Hideo AMAGUCHI<sup>1,2</sup> and Ryota TSUBAKI<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>正会員 土木学会 水工学委員会河川部会 流域減災ワーキング・グループ

<sup>2</sup>正会員 博士(工) 首都大学東京 助教 都市基盤環境工学専攻 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

<sup>3</sup>正会員 博士(工) 広島大学助教 工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

In this review paper, the state of the art flood inundation prediction model is reviewed. Firstly the applications of flood inundation prediction model for inundation risk, anti-disaster activity and evacuation guidance, multiple disaster of earthquakes and floods are reviewed. We compared several approaches utilized for flood inundation prediction, including Cartesian grid model, generalized curve-linear coordinates, unstructured grid model and others. Trend in grid point number utilized for the inundation prediction modelling is also summarized.

**Key Words:** Inundation prediction model, mitigation of flood disaster, hazard prevention

### 1. はじめに

洪水は河川流域の水循環において重要なイベントであり、河川管理する上での治水・利水・環境に大きな影響を及ぼしている。豪雨による浸水被害を予測し、安全でかつ迅速な避難計画の検討や住民に対するハザードマップなど、高精度な防災情報を提供することが河川技術者に求められている。本総説は、河川技術論文集の流域減災に関わる掲載論文・報告を踏まえて、浸水被害予測技術に関する研究動向を概説し、今後取り組むべき課題を検討するものである。既往の浸水予測技術について最新の研究動向等も踏まえつつ、特に解析モデルが対象としている地表面の浸水（氾濫）現象と適用の範囲、そして実用面から見たモデル構築の容易性およびその特性に加え、氾濫計算規模とそのトレンドについて概説する。

### 2. 浸水被害予測技術

#### (1) 浸水被害予測技術の活用

未曾有の記録的な豪雨、越流による破堤、治水整備の遅れ、都市化と水害、情報伝達と避難そして新しい河川計画整備方針や整備計画との関連から、水災防止は施設整備とハザードマップなどに支援される住民行動を期待する両面からの減災対策が求められている<sup>1)</sup>。ここで、浸水被害のリスク<sup>2)</sup>は図-1に示すように、豪雨により生じた洪水があるレベルを超えた時、破堤や溢水により外水氾濫あるいは内水氾濫が発生により流域の地物が浸水状態となる。浸水区域内における家屋等の資産の耐浸水性状況に応じた規模の被害が発生する。もちろん浸水が無ければ被害は発生しない。瀧ら<sup>3)</sup>は、流域・氾濫原の

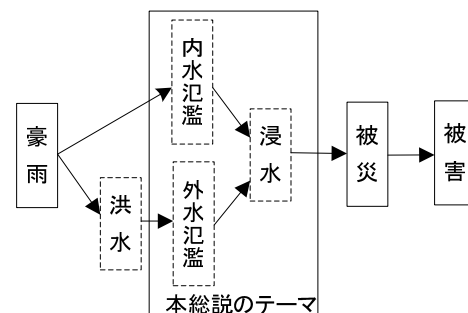


図-1 豪雨から浸水被害の流れ

各地点の安全性に着目して、河川・水路群に囲まれる地先の水害リスクを評価する手法を提案し、滋賀県の主要氾濫域への適用を行っている。そして、治水整備対策の必要となる箇所が野放図に増加しないように、水害リスクを考慮した土地利用の規制・誘導を進めるなどした「地先の安全度」を制御する氾濫原管理の積極的な展開が必要であるとしている<sup>4)</sup>。市川ら<sup>5)</sup>は、水災害危険度に基づいて土地利用規制対策を実施した場合に生じる費用と便益を比較し、人口減少下では土地利用規制の効用が拡大する可能性について示唆している。寺本ら<sup>6)</sup>は大阪・東京地域を対象とした二種類の土地利用規制（床下浸水規制と床上浸水規制）を実施した場合について費用便益評価の結果、床上浸水規制の場合に総便益がプラスになることを示している。驚見ら<sup>7)</sup>は、都市コンパクト化に向けた氾濫リスク解析としてある地域で浸水リスクの高い農地が都市化した場合の被害額の増加量を定量的に示している。

特に大規模水害の発生前からタイムライン（防災行動計画）<sup>8)</sup>を意識した対応が求められており、浸水被害予

測技術水防活動への活用にはタイムラインを念頭においた研究が活発化している。川中ら<sup>9)</sup>は洪水ハザードマップにおいて避難困難度や避難開始時期に関する検討を行っている。中島ら<sup>10)</sup>は中小河川流域における氾濫解析結果を活用し、さらに田中ら<sup>11)</sup>は土石流の発生を考慮して、地域特性に応じた避難準備情報や避難勧告等の発令優先順位の設定方法を検討している。竹之内ら<sup>12)</sup>は、氾濫解析モデルのシミュレーション結果を用いて、気象・水象情報と住民にとって身近な道路冠水などと指標として、水災害のイメージを事前に共有することの有効性を示している。また、藤原ら<sup>13)</sup>は都市域の浸水予測モデルと避難支援モデルを統合し、Xバンドレーダ雨量（実況、予測）等を用いて開発モデルによるリアルタイム洪水・浸水予測演算を行い、情報伝達では予測結果を用いて浸水深の表示やアラート配信など、防災担当者が必要となる様々な情報を効率的に統合したシステム開発を行っている。

都市部では、河川への雨水流出軽減策として様々な貯留施設が設置されている。川池ら<sup>14)</sup>は下水管渠に接続する調節池の分流プロセスをモデル化し、内水氾濫軽減効果について検討している。また都市域での地下空間の利用が進む中で地下での浸水危険性に関するガイドラインが策定<sup>15)</sup>され、浸水被害予測技術を活用した多数の研究が行われている。井上ら<sup>16)</sup>や関根ら<sup>17)</sup>の地下空間への氾濫浸水解析に関する研究をはじめ、水害防止対策<sup>18)</sup>や近年では地下空間での避難行動を想定した研究<sup>19)~21)</sup>が行われている。

東日本大震災以降、これまで想定外とされてきた低頻度で大規模な災害に対し、事前に減災対策を検討する重要性が認識されている。これを反映して浸水被害予測技術を活用した様々なシナリオ分析が行われている。松浦らの研究<sup>22)</sup>では地震と洪水の複合災害による被害試算と被害特性を分析して堤防耐震化の効果を示し、福原ら<sup>23)</sup>は地震と洪水の対策効果とその特性について分析を行っている。また、中川ら<sup>24)</sup>は浸水解析結果を用いて地震豪雨複合災害時の病原感染リスク評価を行っている。

以上のように、浸水被害予測技術を活用した様々な研究が行われている。次節以降では、基盤技術として浸水域の地形の表現方法すなわち解析格子形状の取り扱い方に関するレビューを行う

## (2) 基盤技術

1980年代以降、数値解析技術が飛躍的に向上したことにより、数値モデルによる実用的な氾濫現象の予測が行われるようになった。現在多用されている氾濫解析モデルは岩佐ら<sup>25)</sup>により研究された浅水方程式が端緒となっており、その後に建物や道路などの影響や破堤に伴う水理現象を組み込むことにより、氾濫解析モデルの高度化が進められている。密集市街地を対象とした氾濫解析では、内水浸水被害予測を目的する下水道システムを組み込んだモデルが標準となり、さらには直接流出量の予測精度を向上化させる手法について研究が進められている。

表-1は、氾濫解析モデルにおいて、これまでに提案された解析格子形状の特徴についてまとめたものである。また、図-2には解析格子形状のイメージを示す。デカルト座標系モデルは格子生成および計算効率が高く実務で多く利用されており、家屋や道路網等が氾濫水に与える影響を考慮するための様々な手法についての研究されている。都市域を対象とした場合、氾濫水は盛土などの地形起伏だけでなく建物などの構造物、道路、水路、下水道管路網などの様々な人工構造物に大きな影響を受ける。このような都市域に用いられる解析格子形状は、一般曲線座標系、非構造格子、街路ネットワーク、地物を用いたモデルが開発されている。これらのモデルの格子生成は困難ではあるものの、都市域特有の街路を表現可能であることや、少ない格子数で複雑な地形や境界形状を表現することが可能である。

## 3. デカルト座標系を用いた浸水予測技術

デカルト座標系を用いてモデル構築する利点は格子生成の容易さに加え、解析に必要な国土数値情報や統計デー

表-1 浸水予測モデルの解析格子形状による分類

解析格子形状	特徴	格子生成の方法
デカルト座標系	格子生成および計算効率が良い 実務で多用されている	自動格子生成が可能
一般曲線座標系	主要街路の表現が可能	手作業か一部自動化
非構造格子	少ない格子数で複雑な地形や境界形状を表現可能	手作業 GIS データとメッシュ生成プログラム
街路ネットワーク	複雑な街路網を表現可能	GIS データ整備の進展により比較的容易
地物	複雑な都市構造を表現可能	GIS データを用いて一部自動化

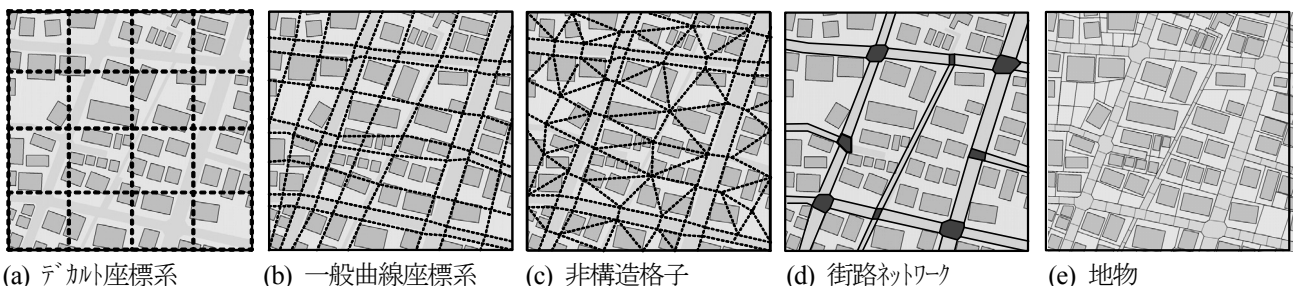


図-2 解析格子形状の特徴

タがデカルト座標系で整備されていることである。モデル構築の容易さから農地の浸水被害への適用<sup>26)</sup>など、様々な形で利用されている。またデカルト座標系では都市構造などを適切に評価することが困難であるとされてきたが、解析格子内部の都市構造や地盤高分布を考慮するサブモデルを導入することにより再現性の向上が試みられてきた。

#### (1) 都市構造の表現方法

末次・栗城<sup>27)</sup>は、都市域の建物による流れの影響を考慮するために、各格子における土地利用に応じた等価粗度係数または建物占有率や浸水深の関数としての合成粗度係数の算定方法を示した。本手法は、汜濫シミュレーション・マニュアル（案）<sup>28)</sup>、都市汜濫解析モデル<sup>29)</sup>で用いられるなど、これまでの実務において標準的に用いられてきた。その後、汜濫流が都市域を通過する場合、地形の影響だけでなく建物等により汜濫水が阻止され、道路等の空間に流れが集中する現象についての研究が行なわれた。三浦ら<sup>30)</sup>による密集市街地における汜濫解析手法に関する研究では、建物による通水阻害と非浸水空間を考慮した連続式を提案している。汜濫流が集中する道路等の表現には10mメッシュ程度の解像度から道路等の建物占有率がゼロとなるメッシュを連続的に配置した非構造格子が有効であることを示した。また内田ら<sup>31), 32)</sup>は、汜濫水が不透過となる建物群に対して、計算格子では浸水する境界領域は空隙率を用いて表現されるコントロールボリュームであると設定し、汜濫水が通過する境界線上には透過率を用いて、計算格子内で境界条件が分布を持つことを前提とした解析手法を提案している。すなわち解析格子には各格子の面的平均値としての水深・流速などの水理量が与えられるが、これらの水理量を各格子の面的平均値に加えて、x方向およびy方向の境界線での線平均値とその交点における点値を用いて、CIP法により連立して解くことにより各格子で複数定義されたパラメータを直接考慮した解析手法である。流体占有率の格子内分布を表現することにより、市街地汜濫流を扱う場合、主要道路幅の格子スケールであれば、汜濫水の挙動を計算できることを示唆している<sup>33)</sup>。

平成26年3月の浸水想定区域図作成マニュアル（改訂版）<sup>34)</sup>においては、地形の影響だけでなく建物等により汜濫水が阻止され、道路等の空間に流れが集中することを考慮できる基礎式を用いることが標準化され、今後の洪水ハザードマップ作成に活かされている。

#### (2) 解析速度の向上と解析精度の維持技術

近年5mメッシュの高解像度地盤高データの整備が進み、25m以下のメッシュを用いた解析が浸水想定区域図作成マニュアル（改訂版）<sup>34)</sup>でも奨励されている。計算機技術の向上も着実に進んでいるものの数百km<sup>2</sup>を対象とした大河川流域の汜濫解析では解析速度やデータ処理の面で課題が多い。また水防活動を目的とした実時間予測では、解析精度を維持しつつ解析速度を向上させるなどの手法が必要とされている。

h-VA汜濫解析法<sup>35)</sup>は、ポンドモデルの特徴<sup>36)</sup>を活用して5m地盤高から数10m程度の格子内地盤高特性を求め、

格子毎の水深と水量、格子の辺毎の水深と流水断面積の関係（地盤高特性）を用いることに特徴がある。h-VA汜濫解析法では、格子内に流入した水は格子内地盤高の低い方へ瞬時に流れ、連続式の未知量は水深ではなく水量(体積)とすること、運動方程式において、移流項、粘性項が大きく影響を与えず省略できると仮定し、流量を未知量とすることを仮定している。これにより、格子が比較的大きい場合でも計算後の処理で詳細な水深分布を描けることや計算時間の短縮がはかられている<sup>37)</sup>。

武内ら<sup>38)</sup>は平面二次元汜濫解析において、5m地盤高から数10m程度の格子内平均地盤高を求め、平均値と5m地盤高との比高を内部境界条件として取込む実用的な手法を提案し、50mメッシュを利用した場合でも精度よく浸水域を再現できることを示している。

一方、安田ら<sup>39), 40)</sup>はデカルト座標系を基本としながらも局所的に高解像度化することに着目し、四分木構造を用いて河道と汜濫原とを統合的に解析する手法を開発している。格子構成には基本となる格子辺長に対しこれが1から3段階に変化する3種類の格子生成を設定している。四分木構造の構造格子生成には、境界適合などの局所的な高解像度化の実施が要求される点や線分の任意個数の座標値と基本となる格子辺長と細分化する階層数が用いられている。実領域での適用において汜濫解析の水理的な適用性について検証がなされており、格子数および計算時間の70%以上を削減する結果が得られている。

#### 4. 非構造格子等を用いた浸水予測技術

汜濫解析においては、河川堤防の破堤直後など家屋およびその周辺での微視的な汜濫状況を予測することに主眼を置くのか、街区と道路から構成される市街地全体の流れを予測するかにより構成する格子構造の大きさが異なる。川池<sup>41)</sup>らは都市域の汜濫解析モデルの研究において、デカルト座標系、一般座標系、非構造格子および道路網をネットワーク化した汜濫解析手法を比較することによりそれらの特性を示している。非構造格子や街路ネットワークモデルはデカルト座標系と比べて、地形形状や市街地の複雑な形状を少ない格子数で正確に表現できるため、市街地等の複雑な形状を取り扱う汜濫モデルにおいては非常に有効な手法であるが、格子生成の手に労力と時間が掛かるという問題が指摘されているものの近年のGISデータの整備や自動格子生成技術の向上により、データ構築の弊害は徐々に無くなりつつある。

##### (1) 非構造格子モデル

秋山ら<sup>42)</sup>は、非構造格子と高解像度風上差分法に基づく数値解析手法を用いることで、非定常性の強い破堤汜濫を含む外水汜濫を適確に再現し、密集市街地での複雑な流況や家屋等の作用する流体力評価の可能なモデル構築を行っている。非構造格子の生成方法は、例えば飯塚市を対象とした適用において、河道、街区および街路などの市街地構造のGISデータに対し、街区毎に異なる分割数を設定し、街路では汜濫水の流れを事前把握してから分割数を設定するなどして、メッシュエネクトを用いて解析対象領域を三角形の計算メッシュに分割する方法を採用し

ている。氾濫原の計算メッシュの標高データは、各セル内に含まれる標高を平均化したものを与えている。解析の結果より、十分な精度で湛水深や湛水域を予測できること、また、氾濫発生箇所、氾濫水の広がる経路、湛水箇所・湛水量・排水プロセスなどの詳細な氾濫プロセスを予測できることを示している。

一方、安田ら<sup>43)</sup>は高速演算が可能な浸水域予測モデルとして、非構造格子モデルに着目したモデルを提案している。すなわち、氾濫流の予測計算の精度として浸水面積を基準とし、氾濫流の伝搬や拡散に影響を与える地形特性としての道路や鉄道などの連続線状境界を用いた格子分割として地形適合格子を提案している。さらにデカルト座標系での武内ら<sup>38)</sup>と同様に、地形適合格子では標高情報を格子辺で囲まれた範囲の地盤の平均標高値と、各格子頂点で道路や盛土などの線状境界の標高値を個別に保持できるように定義している。このため、氾濫流の伝播を妨げるものと考えられる道路・アゼなどの線状境界をその形状に合わせて適切にモデル化することが可能である。地形適合格子の数値解法は、格子毎の格子辺長や隣接格子との対応関係を整理した情報に基づき、移流項を除いた1次元流れの運動方程式を用いている。那珂川と涸沼川の合流付近を対象とした約50km<sup>2</sup>のモデル構築では、地形適合格子では3,058個で線状境界には河川境界、アゼや盛土などの線状境界、道路境界が設定されている。既往の再現計算では、デカルト座標系を用いた50mメッシュ(19,400個)による比較検討が行われ、最大浸水区域を良好に再現することを示している。

## (2) 街路ネットワークと地物による浸水域のモデル化

川池ら<sup>41)</sup>は、道路に沿った流れを重視した場合の氾濫解析モデルについて、市街地の道路網をネットワークとして1次元解析法を適用した手法を提案している。道路の交差点をノード、交差点間の道路をリンクとみなし、道路ネットワークで囲まれた領域を住区としたモデルである。道路のリンクでは、始点から終点ノード向きにx軸をとり、長方形水路とみなした1次元解析法が適用され、交差点および住区ではそれぞれを解析格子とみなして連続式から水深を求める手法である。関根<sup>44)</sup>は、住宅密集地を抱える東京都都心部を対象とした集中豪雨による内水氾濫に関する数値解析手法として、「街路ネットワーク浸水・氾濫解析モデル」を提案している。その中で地表面流を解析する街路ネットワークの構築には、一般に入手可能な「縮尺1/2500の地形図」より交差点間の距離と道路幅の情報を、「数値地図5mメッシュ(標高)」より交差点の標高値を用いることが可能なので、モデル構築は比較的容易であると思われる。関根ら<sup>45)</sup>はこの手法を神田川流域に適用し、浸水・氾濫予測計算を行い「浸水危険度」に関する検討を行っている。

天口ら<sup>46), 47)</sup>は、都市構造を忠実に再現するためのGISシステムを用いたデータベースとして、道路、河道、そして街区内に存在する個々の建物、駐車場、緑地などからなる地物データGISを構築するとともに、これを用いた都市流域の洪水流出・浸水解析モデルとしてTSR(Tokyo Storm Runoff)モデル提案している。TSRモデルの地表面の解析格子表現法の特徴として、上述の解析

格子は洪水(氾濫)の流れに着目していることに對し、都市流域の個々の土地利用構造に着目している点にある。TSRモデルで用いられている地表面流の解析には、上述の安田ら<sup>37)</sup>と同様に移流項を除いた1次元流れの運動方程式が用いられている。実流域での適用としては神田川流域の江古田川を対象に解析が行われ、解析格子数は流域面積約1km<sup>2</sup>に對し10000個程度で、再現計算では良好な浸水範囲の予測がなされている。解析に用いる地物データGISの構築には手作業によるところが多いが、1/2500地形図標準データファイルを用いた解析格子の自動構築に関する研究<sup>48), 49)</sup>が行われている。

## 5. 氾濫計算の規模とトレンド

計算機能力の向上や地形データの高精度化・高解像度化などのトレンドを元に、氾濫計算をより詳細に行うことが可能となっている。また局所的な流れの再現についても詳細な氾濫計算が有効である。ここでは、氾濫計算に関する既発表論文<sup>33), 37), 50)-62)</sup>を元に、計算の規模という観点から、経年的なトレンドを分析することとする。まず、表-2に、氾濫計算を対象として1996年から2013年にかけて発表されたものからベンチマーク的なもの、大規模計算を指向したものをまとめた。それぞれの論文では、計算格子や計算実時間などの情報で不明な点があり、情報の欠損も多いが、近年はデカルト座標系を用いた計算の割合が多くなっている。これは、大規模計算との親和性や詳細な計算格子を用いた場合には、非構造格子等を用いることによる地形再現性の優位性が薄れるためである。

次に、計算規模の指標として、多くの資料で明記されていた計算格子数を対象に、その経年変化を図-3にまとめた。それぞれの氾濫計算は、対象とする現象や計算方法に違いがあるが、概ね右上がりのトレンドが確認できる。その傾向をとらえるため、図-3中の全点を対象とした近似線を破線で、また実用的な計算というよりは、大規模計算のパフォーマンスチェック的な意味合いの強い、白抜き丸で示した斉藤・榎山<sup>50)</sup>とSanders et al.<sup>33)</sup>のデータを除いた点を対象として近似線を実線でプロットしている。前者では概ね10年で一桁、後者では5年で一桁の計算格子数の伸びとなっている。このトレンドを元に、今後の実用的な氾濫計算の格子解像度を予測すると、国内の大規模河川の氾濫原のスケールを大まかに1000 km<sup>2</sup>と見積もると、図-3の破線で示したやや悲観的なトレンドでは2030年ごろに5 mサイズの計算格子で実用的に扱うことができ、直線で示した楽観的なトレンドでは2020年頃には5 mサイズでの評価が可能となるという予想となる。

より大きなスケールでの氾濫現象をより詳細な計算格子で再現することが可能となりつつあるが、データの前処理や計算結果の整理・可視化などの技術開発は十分とはいえず、計算結果を防災・減災に結びつけていく道筋も必ずしも明確とはいえないのが現状である。また計算格子は詳細になっても、ローカルな水量の再現精度が単純に向上しない部分も残り、境界条件や破堤モデルなどの精度とのバランスにも留意していく必要がある。

表-2 浸水予測モデルの解析格子形状による分類<sup>33), 37), 50)-62)</sup>

発表年	著者	格子の種類	並列化	格子サイズ (m)	計算領域面積 (km <sup>2</sup> )	格子数	計算対象時間 (h)	計算実時間 (h)	備考
1996	斉藤・檜山	非構造格子	メモリ非共有			282,785	13		
2000	戸田ら	非構造格子	不明		129	1,173	24		下水道網有り
2002	川池ら	非構造格子	なし		300	2,915			
2006	椿ら	等間隔非構造	なし	5	0.36	43,095	1.4		
2007	Roberts et al.	非構造格子	メモリ共有			10,785			
2007	川池ら	非構造格子	なし			16,926			
2010	秋山ら	非構造格子	あり(詳細不明)		27.9	19,126	12		流出氾濫下水網連性解析
2010	Sanders et al.	非構造格子	メモリ非共有	10	8	374,414	3		
2010	Yu	デカルト座標系	メモリ非共有	4	800	7,823,921	12	1.6	
2010	Neal et al.	デカルト座標系	メモリ共有, メモリ非共有, GPU			1,000,000	300	40	
2010	Bates et al.	デカルト座標系	メモリ共有		0.4		2		半陰的拡散波近似
2012	佐山ら	デカルト座標系	メモリ共有		929723	321,703	1488	10	流出氾濫解析(拡散波近似)
2012	Brodtkorb et al.	デカルト座標系	GPU	15	108	482,000			
2012	小林ら	デカルト座標系	なし	250	8240	241,255	48		流出氾濫解析(拡散波近似)
2013	佐貫ら	デカルト座標系	不明	10	150	1,500,000	4		津波遡上氾濫

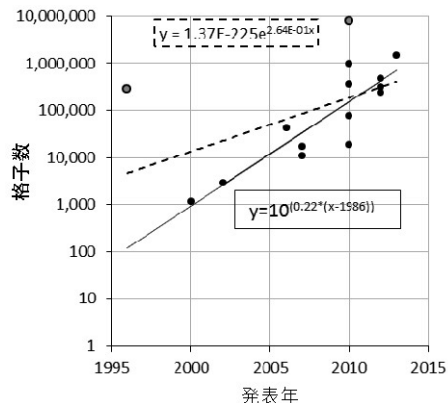


図-3 解析格子形状の特徴

## 6. おわりに

本総説では、河川技術論文集の流域減災に関わる掲載論文・報告を踏まえて、浸水被害予測技術に関する研究動向、地表面の浸水解析技術の現状と氾濫計算規模とそのトレンドについて概説した。浸水被害予測における実務では、モデル構築の容易さなどからデカルト座標系を用いることが主流ではあるものの、1/2500地形図標準データや数値地図5mメッシュ(標高)などの電子データ整備が進み、さらには非構造格子や地物データの自動格子生成の基盤技術も整いつつある。今後はモデル構築の難易度ではなく、対象とする洪水氾濫・浸水区域の特性に応じて適切なモデルを選択できるような全国的なデータ共有基盤の実現が望まれる。

## 参考文献

(斜体は河川技術論文集の掲載総説・論文・報告である。)

- 辻本哲郎：平成16年豪雨災害の特徴と抽出される治水・水防災と工学の課題，河川技術論文集，Vol. 11, pp.115-120, 2005.
- 守田優：都市の洪水リスク解析，フォーラムエイトパブリッシング，2014.

- 瀧健太郎，他5名：中小河川群の氾濫域における減災型治水システムの設計，Vol. 16, 2010.
- 瀧健太郎，他6名：破堤氾濫の危険度評価と減災対策に関する一考察，Vol.17, 2011.
- 市川温，松下将士，堀智晴，椎葉充晴：水災害危険度に基づく土地利用規制政策の費用便益評価に関する研究，土木学会論文集B，Vol.63, No.1, pp.1-15, 2007.
- 寺本 雅子，市川温，立川康人，椎葉 充晴：水災害危険度に基づく土地利用規制の適用性に関する分析，土木学会論文集B，Vol. 66, No. 2, pp.130-144, 2010.
- 鷲見哲也，他2名：都市コンパクト化に向けた氾濫リスク解析，Vol.11, 2005.
- 野呂田亮：国土交通省における打規模水害への備え，月刊建設14-09, pp.14-17, 2014.
- 川中龍児，石垣泰輔：避難困難度指標及び避難開始時期を考慮した洪水ハザードマップの検討，土木学会論文集B1(水工学) Vol.68, No.4, I\_1081-I\_1086, 2012.
- 中島秀明，他6名：中小河川群における内外水氾濫過程を踏まえた地区別の避難判断・行動に関する研究，Vol.20, 2014.
- 田中耕司，他5名：豪雨による洪水・土石流の発生を想定したマルチ・ハザードと避難判断，Vol.21, 2015.
- 竹之内 健介，中島 秀明，田中 耕司，中北 英一，他3名：中小河川群の氾濫解析と気象情報を利用した地域防災計画が想定する災害イメージの事前構築，土木学会論文集F6, Vol. 70, No. 2 pp. I\_37-I\_44, 2014.
- 藤原直樹，他9名：都市域浸水予測・避難支援統合パッケージシステムの実用化に関する研究 Vol.20, 2014.
- 川池健司，他3名：雨水調節池による内水氾濫軽減効果に関する基礎的研究 Vol.21, 2015.
- 国土交通省：地下空間における浸水対策ガイドライン，2001.
- 井上和也，中川一，戸田圭一，溝田敏夫：地下空間への氾濫浸水の解析，地下空間シンポジウム論文・報告集，第2巻，pp95-102, 1997.
- 関根正人，他1名：都市地下空間の浸水被害シミュレーションの試み，Vol.7, 2001.
- 西淳二，他4名：都市地下空間の水災害防災対策に関する基礎的研究，Vol. 7, 2001.
- 錦織俊之，他3名：浸水時の多層地下空間からの避難に関

- する研究, Vol.11, 2005.
- 20) 森政行, 他3名: 浸水シミュレーションを活用した都市地下空間における水防・避難誘導の検討, Vol.15, 2009.
  - 21) 朝日一堯, 他2名: 地上-地下鉄トンネルの統合氾濫解析による地下鉄路線およびその周辺地域の水害脆弱性に関する基礎的検討, Vol.20, 2014.
  - 22) 松浦達郎, 他2名: 地震と洪水の複合災害による被害試算と被害特性の分析, Vol. 20, 2014.
  - 23) 福原直樹, 他3名: 地震と洪水の複合災害に関する被害試算と対策効果の分析, Vol.21, 2015.
  - 24) 中川直子, 河村明, 天口英雄, 湯浅信平: 都市河川流域を対象とした地震豪雨複合災害時における病原感染リスク評価手法の提案, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.70, No.4, pp. I\_907-I\_912, 2014.
  - 25) 岩佐義郎, 井上和也, 水島雅文: 氾濫水の水利の数値解法, 京都大学防災研究所報, 第23号B-2, pp.305-317, 1980.
  - 26) Shrestha, B.B, Others: Rice-Crops Flood Damage Assessment in the Pampanga River Basin of the Philippines, Vol.21, 2015.
  - 27) 末次忠司, 栗城稔: 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, 土木学会論文集, No.593/II-43, pp.41-50, 1998.
  - 28) 栗城稔, 末次忠司, 海野仁, 田中義人, 小林裕明: 氾濫シミュレーション・マニュアル(案), 土木研究所資料, 1996.
  - 29) 中村徹立, 佐々木淑充, 水草浩一, 都市域氾濫解析モデル活用ガイドライン(案), 国総研資料, 第202号, 2004.
  - 30) 三浦心, 川村育男, 木村一郎, 三浦敦禎: 扇状地に発達した密集市街地における氾濫解析手法に関する検討, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.67, No.4, I\_979-I\_984, 2011.
  - 31) 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, Vol. 50, pp.799-804, 2006.
  - 32) 内田龍彦, 河原能久, 木梨行宏, 伊藤康: デカル座標系を用いた市街地氾濫シミュレータの構築と竹原市の高潮氾濫への適用, 水工学論文集, Vol. 51, pp.517-522, 2007.
  - 33) Sanders, B. F., Schubert, J. E. and Detwiler, R. L.: ParBreZo: A parallel, unstructured grid, Godunov-type, shallow-water code for high-resolution flood inundation modeling at the regional scale, *Advances in Water Resources*, Vol. 33, pp. 1456-1467, 2010.
  - 34) 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課 水防企画室: 浸水想定区域図作成マニュアル(改訂版), 2014.
  - 35) 武田誠, 小寺大輔, 松尾直規: 格子内の地盤高特性を考慮した簡便な氾濫解析法に関する研究, 水工学論文集, 第52巻, pp.853-858, 2008.
  - 36) 土木学会編: 水理公式集, 平成11年版, p.128, 1999.
  - 37) Yu, D.: Parallelization of a two-dimensional flood inundation model based on domain decomposition, *Environmental Modelling & Software*, Vol. 25, No. 8, pp. 935-945, 2010.
  - 38) 武内慶了, 他6名: 内部境界条件としての微高地の取り込み方法が浸水予測結果に与える影響, Vol. 20, 2014.
  - 39) 安田浩保, 星野剛: 四分木構造格子による局所的な高解像度格子を導入した 浅水流方程式の数値解析法, 土木学会論文集 A2, Vol. 67, No. 2, I\_693-I\_702, 2011.
  - 40) 星野剛, 他3名: 解析コストの効率化を目的とした河道・氾濫原一体型解析法の提案, Vol.19, 2013.
  - 41) 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 P 1-10, 2002.
  - 42) 秋山壽一郎, 他2名: GISを用いた氾濫解析データの作成と飯塚市を中心とした都市域の氾濫解析, Vol. 14, 2008.
  - 43) 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.
  - 44) 関根正人, 住宅密集地域を抱える東京都心部を対象とした集中豪雨による内水氾濫に関する数値解析, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.67, No.2, 70-85, 2011.
  - 45) 関根正人, 他2名: 都市浸水予測技術による豪雨時の神田川流域の雨水排除機能と浸水危険度に関する評価, Vol.21, 2015.
  - 46) Amaguchi, H., Kawamura, A., Olsson, J. and Takasaki, T. : Development and testing of a distributed urban storm runoff event model with a vector-based catchment delineation., *Journal of Hydrology*, No.420-421, pp.205-215, 2012.
  - 47) 天口英雄, 他4名: 都市流域を対象とした建物浸水モデルの提案, Vol. 19, 2013.
  - 48) 田内裕人, 天口英雄, 河村明, 中川直子: 1/2500地形図標準データファイルを用いた高度な地物データGISの自動構築に関する研究, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.69, No.4, pp.I\_523-I\_528, 2013.
  - 49) 田内裕人, 天口英雄, 河村明, 他2名: 都市域における洪水流出解析を目的とした微小道路要素の自動構築手法に関する研究, GIS理論と応用, Vol. 22, No.2, pp.25-34, 2014.
  - 50) 斎藤克矢, 樫山和男: 非構造格子に基づく大規模超並列計算とその有効性について, 水工学論文集, Vol. 40, pp.1095-1100, 1996.
  - 51) 戸田圭一, 井上和也, 村瀬賢, 市川温, 横尾英男: 豪雨による都市域の洪水氾濫解析, 土木学会論文集, No. 663/II-53, pp. 1-10, 2000.
  - 52) 川池健司, 井上和也, 戸田圭一, 坂井広正, 相良亮輔: 低平地河川流域における内水氾濫解析法とその寝屋川流域への適用, 水工学論文集, Vol. 46, pp. 367-372, 2002.
  - 53) 椿 涼太, 藤田一郎, 岡部健士: 航空レーザー測量を用いた高解像度非構造格子の自動生成と氾濫解析, 土木学会論文集B, Vol. 62, No. 1, pp. 41-52, 2006.
  - 54) Roberts, S. G., Stals, L. and Nielsen, O. M.: Parallelisation of a finite volume method for hydrodynamic inundation modelling, *ANZIAM Journal*, Vol. 48, pp. C558-C572, 2007.
  - 55) 川池健司, 中川 一, 馬場康之: 平成18年7月豪雨時の川内川洪水解析と推定分水路の影響の検討, 水工学論文集, 第52巻, pp. 811-816, 2007.
  - 56) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 小園裕司: 流域特性を考慮した都市域氾濫解析モデルと都市域での浸水プロセスの予知, 水工学論文集, 第54巻, pp. 919-924, 2010.
  - 57) Neal, J. C., Fewtrell, T. J., Bates, P. D. and Wright, N. G.: A comparison of three parallelisation methods for 2D flood inundation models, *Environmental Modelling & Software*, Vol. 25, pp. 398-411, 2010.
  - 58) Bates, P. D., Horritt, M. S. and Fewtrell, T. J.: A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling, *Journal of Hydrology*, Vol. 387, pp. 33-45, 2010.
  - 59) 佐山敬洋, 藤岡奨, 牛山朋来, 建部祐哉, 深見和彦: インダス川全流域を対象とした2010年パキスタン洪水の降雨流出氾濫解析, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.68, No.4, I\_493-I\_498, 2012.
  - 60) Brodtkorb, A. R., Sætra, M. L. and Altinakar, M.: Efficient shallow water simulations on GPUs: Implementation, visualization, verification, and validation, *Computer & Fluids*, Vol. 55, pp. 1-12, 2012.
  - 61) 小林健一郎, 寶 馨, 佐野 肇, 津守博通, 関井勝善: 損害保険に応用可能な国土基盤情報準拠型の分布型降雨流出・洪水氾濫モデルの開発, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.68, No.4, I\_1069-I\_1074, 2012.
  - 62) 佐貫 宏, 竹森 涼, 田島芳満, 佐藤慎司: ビデオ映像と数値シミュレーションに基づく河川津波の氾濫解析, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 69, No. 2, p. I\_196-I\_200, 2013.

(2015. 4. 3受付)