

# 電子データベースを統合した 都市氾濫モデルの構築

## CONSTRUCTION OF URBAN INUNDATION MODEL BASED ON INTEGRATED DIGITAL DATA

馬場洋光<sup>1</sup>・真野 明<sup>2</sup>  
Hiromitsu BABA and Akira MANO

<sup>1</sup>学生会員 東北大学大学院 工学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-1110)

<sup>2</sup>正会員 工博 東北大学教授 工学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-1110)

In this study, taking up the area which is not put up city block data, calculation technique to calculate city block is developed according to combining digital map 2500 with city region digital map in Sendai City. Besides in these years digital sewage map is computerized in various regions. And so we can obtain from digital sewerage map the information, and the technique which can connect to the road network on the ground was developed. Furthermore the method to divide into pervious area and impervious area which has an effect on the landside inundation with laser profiler data is developed. Based on the above result, analytical model is applied to rainfall of August, 1986, and the result set against the questionnaire result.

*Key Words : Digital map 2500, Digital sewage map, Laser profiler data, Grid setup, Infiltration, Pervious area, Impervious area*

### 1. はじめに

近年, 2000年の東海や2004年の新潟, 2006年の九州豪雨など局所的豪雨による都市域での氾濫災害が多く見られる。その原因の一つとしては, 都市での資産や人口の集中や地表面の不浸透化による保水能力の低下等により水害への対応力が低下していることが挙げられる。コンクリートで覆われた都市部では, 洪水の際, 内水氾濫の被害が顕著となる。そのため, 対象域の下水道システムを検討し, 内水氾濫を的確に捉える必要がある。このような浸水災害に対してハード的あるいはソフト的対策を講じる場合には, 氾濫解析による知見が非常に重要なことから, 精度の高い解析モデルが望まれる。

このような現状から数多くの研究者が解析モデルの構築に取り組み, 解析モデルの精度の向上が図られてきた。その事例として, 井上ら<sup>1)2)</sup>の研究など非構造格子を用いた解析が近年行われている。このモデルの特徴として複雑な地形や境界を取り込むことが容易であるが, 格子設定の手間や計算時間の短縮化が課題となっている。

そこで本研究では, 格子設定において国土地理院発

行の数値地図2500<sup>3)</sup>と市域デジタルマップ<sup>4)</sup>を活用することで格子設定の開発を図り, 街区と道路を区別した非構造格子設定を用いた地表面流出計算を行った。ここで市域デジタルマップとは主に市で扱っている街区などを収容したデジタルマップデータと定義する。また, 都市部の内水氾濫のシミュレーションを行なう上で, この浸透・不浸透領域の把握は重要であり, レーザープロファイラーのデータを用いて, 街区における不浸透面積率を評価する技術を新たに開発し, 地表損失と浸透を考慮したモデルの開発を行った。

以上の手法を, 仙台市原町東部排水区においてで近年で最も被害の大きかった, 昭和61年豪雨洪水に適用した。この豪雨は, 昭和61年8月1日, ルソン島沖で発生した台風10号が, 北上発達し熱帯低気圧に変わった後仙台沖を通過し, 東北太平洋岸に大雨をもたらしたものである。仙台での総降雨量は402mmに達し, 明治21年観測開始以来の過去最大となり, 再現期間は約200年と見積もられている。解析結果の精度検証は, 市や県の行政に過去の浸水被害データが無かったために, 住民へのアンケート調査という方法を用いた被害実態調査から当時の浸水深を把握し, 解析結果と比較を試み, 考察を行った。



図-1 原町東部排水区の概要



図-2 対象領域の地盤高

## 2. 対象領域

解析対象領域は仙台市東部に位置する扇町，卸町を中心とする約11km<sup>2</sup>の原町東部排水区一帯とした（図-1）。東部には七北田川，北部には梅田川が流れている。この排水区は，西側が高く東側に向かっておよそ1/150の勾配で低くなっており比較的に低平な地域である。地盤高に関してであるが，国際航業株式会社によるレーザープロファイラー<sup>5)</sup>は約2m間隔で細かく地表をスキャンし，そこでのレーザー反射光を処理して標高を算出しているので，建物や樹木など地表に物体があるところでは物体の表面の標高を測ることになる。図-2は，数値フィルターによりそのような地表物体を取り除き，地盤の標高分布を示したものである。

扇町は，流通・工業地帯を形成しており，卸町商業団地内は生鮮食料品等の市場が集中して存在する場所であり，3~10階建て程度のビルや倉庫が建ち並んでいる地区である。また，この地域は過去に幾度か豪雨により浸水した記録がある。都市化の進展に伴う雨水浸透の減少などに起因して都市型水害が多発しているのが現状であり，雨水対策が急務となっている地域と言える。



図-3 市域デジタルマップと数値地図2500を重ねたもの

## 3. 解析モデル

数値地図2500(空間データ基盤)は全国の市町村を網羅した，国土基盤データであるが，地域によって搭載するデータ項目に欠落しているものがある。例えば「東海圏」，「広島」，「福岡3」，「宮城1」，「宮城2」などでは，街区データを搭載していないために，佐藤らが開発した手法<sup>6)</sup>でこれらの地域を解析するためには工夫が必要になる。本研究では，「宮城1」，「宮城2」にまたがる地域として，新たに仙台市を取り上げ，補完技術の開発を行なった。また，仙台市は平成15年(2003年)に市域デジタルマップを独自に作成している。これは，街区と主要な建物のデータを有するGIS形式のデータベースで，前者は航空写真から，後者は航空写真に現地踏査を加えて作成したものである。この市域デジタルマップから街区データを取り出し，GISソフト上で数値地図2500と重ね合わせることで，街区ポリゴンと道路要素の対応を関係付けた。図-3に市域デジタルマップと数値地図2500を重ね合わせた結果を示しているが，両者の道路部分が正確に重なることが確かめられた。

### (1) 格子設定

実際の街区は大きささまざまな大きさや形のものがあり，小さな街区を正確に計算に取り込んでも精度の向上が期待できず，計算数を増やすことにつながるため，小さな街区は結合し簡単化することにした。図-3の中の太い線で囲んである，大きな街区が結合したものである。これはGISソフトのポリゴン作成ルールを用いて，結合し簡単化したものである。これをGISソフト上で行うことによって各街区に座標を持たせることができる。また，流量算出に用いるため面積を計算する。そしてその全てのポリゴン，数値地図2500から取得したライン，ポイントにそれぞれ番号を振り，その番号をもとにGISツールを用いて各道路ラインの両端にある交差点を認識する。次に，ポリゴンの各辺に最も近いラインをそのポリゴンに対応するラインとし，すべての街区ポリゴンの周囲に位

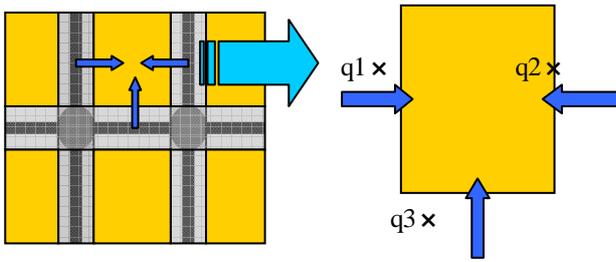


図-4 地表面流出のモデル

置する道路ライン番号を座標を基に認識することで対応するメッシュのネットワークを構築した。最後に2mメッシュ標高データを用いて各メッシュに含まれる標高データの平均値を求め、街区、道路、交差点それぞれに標高を与える。

### (2) 地表面流出モデル

地表面流出においては、(1)式の連続式と(2)式の Manning式から各格子の時間ステップごとの水位・流量を求める。街区および道路部における計算では、佐藤らの研究を基に以下のように粗度係数を決定した。また、街区部における建物の占有率から、下式より住区部への流量通過率<sup>7)</sup>を計算した(図-4)。ここで、 $h$ は基準面から上方にとった水面変位、 $A$ は格子面積、 $\sum Q_i$ はメッシュからの流入量、 $R_{in}$ は降雨による流入量、 $R_{out}$ は降雨損失、 $S$ は下水管渠への流入量、 $q$ は単位幅流量、 $I$ は路床の勾配、 $R$ は径深、 $\beta$ は流量通過率、 $\lambda$ は建物面積率を表す。

$$A \frac{dh}{dt} = \sum Q_i + R_{in} - R_{out} - S \quad (1)$$

$$q = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} h \quad (2)$$

$$\beta = \sqrt{1 - \lambda} \quad (3)$$

表-1 メッシュにおける粗度係数

	街区	道路
粗度係数 $n$	0.067	0.043

### (3) 下水道流出モデル

下水管渠網の設定は仙台市電子下水道台帳<sup>8)</sup>を基に作成した(図-5)。仙台市では500分の1の縮尺で作成してあった紙版の下水道台帳施設平面図、資産管理図等を、同じ平成15年にすべて電子化し一元管理している。このデータを利用し、地上の街区や道路のネットワークと結合することにより、都市域での氾濫水の挙動を解析する、格子・管路網を効率よく作成する技術を開発した。実際の下水管渠は非常に複雑である。よって本研究では簡略



図-5 2000mm以上の下水管渠網

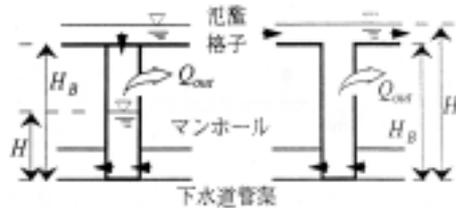


図-6 マンホール部の模式図

化のため2000mm以上の主要幹線のみを抽出した。幹線に接続するマンホールを対象とし、地上の道路網で交差点に最も近いマンホールを検索し、交差点番号とそのマンホール番号を結合することにより、道路網と下水幹線網が接続した水路網が計算機の中に作られることになる。マンホール部の水位は(1)式の連続式を用いて、地表面からの落ち込み流量と(2)式の Manningの式から求められる下水管内流量の収支から求める。下水管内の動水勾配は両端に接続されているマンホールの水位から求め、管径、管長は下水道台帳の値を用いる。地表面からの都市マンホールへの落ち込み流量は本間の越流公式から算出し、マンホール水深が地表面の標高未満であれば完全越流とし、地表面の標高以上であれば不完全越流及びもぐり越流として地表面への逆流量を算出する。

完全越流の場合( $h_1 / h_2 < 0.45$ )

$$q = 0.35 h_1 \sqrt{2gh_1} \quad (4)$$

不完全越流( $0.45 < h_1 / h_2 < 0.8$ )及びもぐり越流の場合 ( $0.8 < h_1 / h_2$ )

$$q = 0.91 h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (5)$$

式中において、 $q$  : 単位幅流量、 $g$  : 重力加速度、 $h_1$  : 越流水深、 $h_2$  : 下流水深

### (4) 浸透能特性の考慮

都市内水氾濫をシミュレーションするためには、浸透・非浸透域を適切に検出し、氾濫計算の中で評価することは非常に有効である。本モデルは街区別に浸透域と不浸透域に分割し、それぞれに浸透能特性を考慮する有

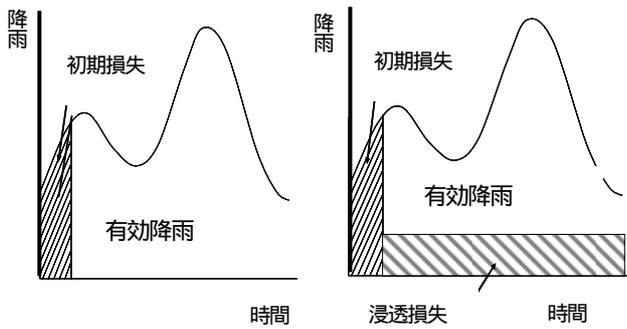


図-7 浸透域 (右) と不浸透域 (左) の有効降雨算定の概念図

効降雨モデルを適用する．最終的に，浸透域と不浸透域の流出量を合わせて1つの街区からの流出量とする．ちなみに，本モデルでは道路部の透水性舗装に関しては考慮していない．

有効降雨の算定には，安藤ら(1985)等が提案した図-7に示す土地利用別に初期損失と終期浸透能を考慮するモデル<sup>9)10)</sup>を用いた．また，最終浸透能の値は山口ら(1970)の測定<sup>11)</sup>により，土地利用別の浸透特性が明らかになっている．有効降雨の算定には，都市域を不浸透域と浸透域に分ける必要があり，以下にその概要を示す．

a) 不浸透域

不浸透域の損失降雨としては，コンクリートやアスファルト面の初期吸水と凹地貯留として初期損失を設定する．不浸透域へ降った雨水は図-7左に示すような初期損失を満たしたあとの雨水が有効降雨となる．

$$R_{out}(t) = \begin{cases} 0 & (\sum R(t) \leq Lim_p) & (6) \\ R(t) \times \frac{60}{DT} & (\sum R(t) \geq Lim_p) & (7) \end{cases}$$

$R(t)$  : 降雨の時系列(mm),  $R_{out}(t)$  : 有効降雨の時系列(mm/h),  $Lim_p$  : 初期損失(mm),  $DT$  : 降雨観測間隔(min)．不浸透域の初期損失量  $Lim_p$  の値については，既存の研究により山口ら(1970)<sup>11)</sup>は谷端川，桃園川，豊橋，名古屋千年の4流域の調査で2mmとし，同様に安藤ら(1981)も多摩ニュータウンで値を2mmとしていることから本研究でも2mmの値を用いることとした．

b) 浸透域

浸透域の有効降雨に関しては，初期損失と最終浸透能の降雨損失を考える．具体的には図-7右に示すように，初期損失  $L_p^{(k)}$  は浸透能が終期浸透能に達する以前の降雨初期の浸透による損失と凹地貯留による損失の和に相当し，初期損失が終了した後の降雨は終期浸透能  $I_c^{(k)}$  を超える分が有効降雨となる．したがって，土地利用  $k$  における有効降雨の時系列  $R_{out}^{(k)}$  は次の算定式

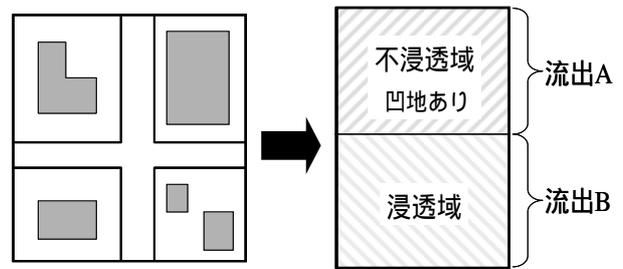


図-8 各メッシュから流出概念図



図-9 街区ごとの不透透面積率

で与えることができる．ここで各メッシュにおける最終浸透能  $I_c^{(k)}$  は民家等で5mm<sup>12)</sup>とした．

$$\sum R(t) \leq L_p^{(k)} \text{ ならば } Re_p^{(k)}(t) = 0$$

$$\sum R(t) \geq L_p^{(k)} \text{ ならば}$$

$$R_{out}^{(k)}(t) = \begin{cases} 0 & (R(t) \leq I_c^{(k)}) & (8) \\ R(t) \times \frac{60}{DT} - I_c^{(k)} & (R(t) \geq I_c^{(k)}) & (9) \end{cases}$$

$k$  : 土地利用区分数,  $I_c$  : 終期浸透能(mm/h)

(5) 不浸透域の把握

不浸透域面積の算出方法であるが，対象領域を図-8のように不浸透域と浸透域を区別するために本研究ではレーザープロファイラーによる建物標高を補完したデータと補完していないデータを用いる．補完していない値から補完した値を差し引くことで，それぞれの座標における建物の有無を確認することができる．また，確認できたポイントをGISソフト上に表示し，街区データと重ね合わせ，各街区内のポイント数を数え上げることで，不浸透域の面積を算出することができる．このように本研究では，レーザープロファイラーデータの上記数値フィルター処理の前後の標高分布データの差を取ることで，建物を検出し不浸透域を算出することとした．ここでは，標高差が2m以上あるところは建物が存在すると判定した．各街区ごとに，建物面積率を求め図-9に%の単位でその分布を示した．これから排水区の南西

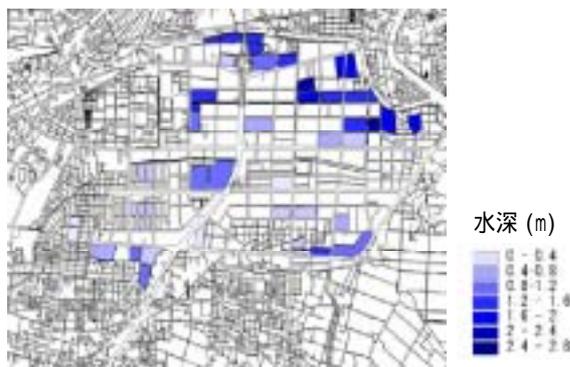


図-10 昭和61年のアンケート結果（最高浸水深）

部分には住宅地域が広がっており，比較的高い建物面積率の分布となっていることが分かる．建物の無いところでも，表面が舗装されていければ不浸透と考えられるが，ここで述べた方法ではこれは検出できないので，不浸透域と分類した．

#### 4．アンケート調査

昭和61年豪雨洪水は，ルソン島沖で発生した台風10号が，北上発達し熱帯低気圧に変わった後仙台北を通過し，東北太平洋岸に大雨をもたらしたものである．仙台での総降雨量は402mmに達し，明治21年観測開始以来の過去最大となり，再現期間は約200年と見積もられている．この豪雨は被害が大きかったものの，県や市などの行政に過去の浸水状況に関するデータが残されていなかったため，計算に先立ち浸水深を調べるアンケート調査を平成18年10月に実施した．アンケートは浸水被害地域を中心に調査地域を設定し，それらの調査地域から調査対象世帯を無作為に抽出し，調査アンケートの配布は一民家，一企業1枚とした．郵送回収および訪問調査によって行なった．アンケート配布数は84票，回収数39票，回収率46%と決して高い数字ではない．しかし，調査目的は浸水深が大きいポイントを把握することでもあるため，モデルの検証を行うための十分な結果を得られたと同時に，今後もアンケート調査を継続し，検証するためのデータを一層収集する必要があると考える．浸水深分布を図-10に示す．色の無いところは，回答の無い部分である．災害から20年以上経過しており，住民の移動もあって回答数が少ないが，東部の最も地盤の低いところで1.8m程度の浸水深があったことが調査により明らかになった．

#### 5．解析結果および考察

本章では，昭和61年豪雨時の氾濫水の状況に焦点を絞り考察する．解析では，時間刻みを0.2秒，計算時間は24時間とした．また，境界条件についてであるが，排水区

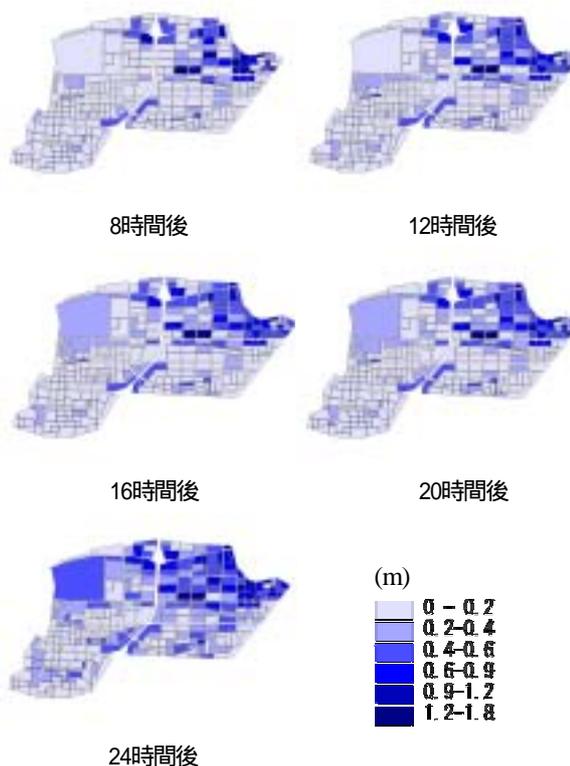


図-11 浸透考慮無しの計算結果

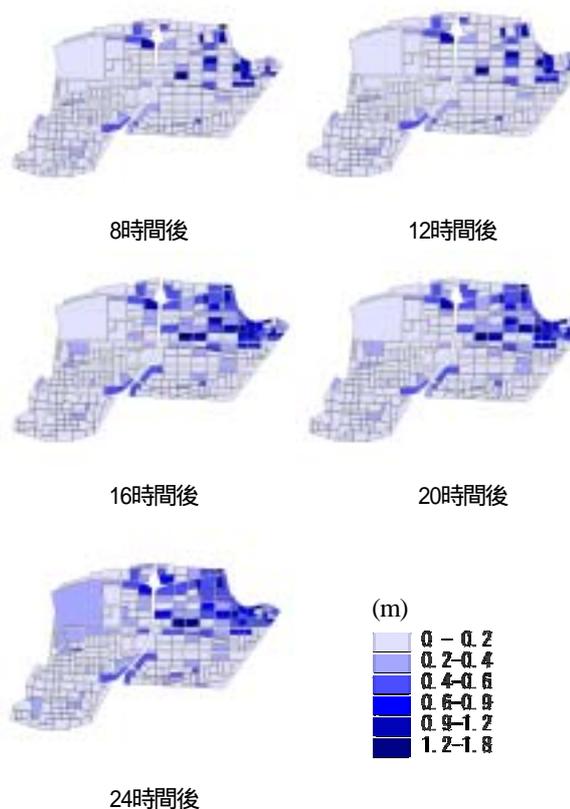


図-12 浸透考慮有りの計算結果

る24時間降雨は，対象領域内の仙台気象観測所によるデータを基にした．計算結果を図-11，12に示す．それぞれ計算開始から24時間後までの浸水深の分布であり，

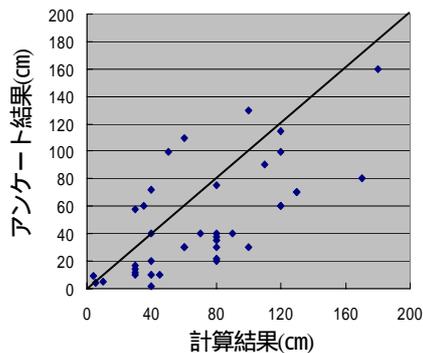


図-13 浸透考慮有りの計算結果

上の図が浸透能を考慮しない場合、下図が浸透能を考慮した場合の計算結果である。図-11によると、浸透能を考慮しない場合は広範囲にわたって浸水し浸水深も大きくなっていることが分かる。最大浸水深も1.8mに近い箇所が数多く分布している。一方、浸透能を考慮した計算結果では、北東部の地盤の低いところに雨水が集中し1.7m程度の浸水となっていた。それ以外のところでも局所的に浸水箇所が見られるが、その深さや広がりは大きくない。各街区における平均不浸透面積率は41.6%であったが、浸透を考慮することで大幅にアンケート結果に近づく結果となった。このことから、初期損失量は降雨損失現象を理解する上で重要なパラメーターであり、基本的には降雨初期の流出に対して非常に大きな影響を及ぼすことがわかった。図-13はアンケート結果と計算結果の相関図である。この結果を見ると、浸水深が大きいポイントにおいて多少のばらつきがあることがわかる。しかし、アンケート調査結果は20年以上前の現象を対象としているので、多少信憑性が薄いとも考えられ、当時の水害に詳しい住民や消防署等からの聴き取り調査も行う必要がある。そのため、定量的な評価はできないが、北東部での集中的な浸水やその大きさなど、浸透を考慮した本計算結果は、調査結果を良く再現していると考えられる。

## 6. おわりに

本論文では、数値地図2500で街区データが搭載されていない地域の代表として仙台市を取り上げ、市域デジタルマップと結合することにより、街区を計算格子とする計算技術を開発した。また、近年各地で下水道台帳の電子化が進められてきている。その流れを受け、電子下水道台帳からデータを読み込み、地上の道路ネットワークと接続する技術を開発した。各メッシュごとに内水氾濫に大きな影響を持つ、浸透・不浸透域の検出をレーザープロファイラーのデータを利用して行なう技術を提案できた。この解析モデルを昭和61年8月の豪雨時の氾濫事例に適用し、その結果をアンケート調査結果と比較した結

果、本解析モデルがほぼ現象を再現していることがわかった。既往の研究<sup>13)14)</sup>では、水循環を考える際に、浸透域は浸透能を用いて表層貯留量・浸透能・直接流出量を計算するモデルが確立されているが、都市における流出計算に用いられる例は数少ない。そこで、今後、これらを参考に地下への浸透を考慮するタンクモデルを用いることと、下水道ネットワークを考慮する対象を増やすことで、より実際の現象に近づける流出モデルを検討したい。

**謝辞：**本研究は平成17・18年度河川整備基金助成事業「道路適合格子を用いた都市域の実態的氾濫数値モデルの開発」(代表：真野明)の補助を受けた。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 大坪郁宜, 櫻井耕史, 武田誠, 松尾直規: GISを用いた氾濫解析システムに関する研究, 水工学論文集, 第45巻, pp.877-882, 2001.
- 2) 川池健司, 井上和也, 戸田圭一: 非構造格子の都市域氾濫解析への適用, 水工学論文集, 第44巻, pp.461-466, 2000.
- 3) 国土地理院: 数値地図2500(空間基盤データ)-宮城1, 宮城2, 2001.
- 4) 仙台市都市計画課: 市域デジタルマップ.
- 5) 国際航業株式会社: 苦竹地区内レーザープロファイラー計測データ.
- 6) 佐藤聡一郎: 地表流と下水道をリンクした都市洪水氾濫解析, 東北地域災害科学研究, 第41巻, pp.105-110, 2005.
- 7) 井上和也, 川池健司, 林秀樹: 都市域における氾濫解析モデルに関する研究, 水工学論文集, 第43巻, pp.533-538, 1999.
- 8) 仙台市施設管理課: 電子下水道台帳
- 9) 安藤義久, 高橋裕, 和泉清, 金尾健司: 土地利用別の浸透能特性を考慮した都市流域の洪水流出解析, 第29回水理講演会論文集, pp.49-54, 1985.
- 10) 藤村和正, 安藤義久: 都市流域における雨水浸透施設による流出抑制効果に関するシミュレーション, 水文・水資源学会誌, 11(4), pp.360-370, 1998.
- 11) 山口高志, 松原重昭, 山守隆: 都市流出機構-降雨損失機構の検討-, 土木技術資料, 13-10, pp.483-487, 1971.
- 12) 藤村和正, 安藤義久, 前田正博: 低地部都市流域の洪水流出モデルに関する一考察, 水工学論文集, 第45巻, pp.79-84, 1995.
- 13) 神田徹, 神吉和夫, 渡辺政広, 前田康宏: 都市流域へのSWMMの適用におけるモデル・パラメータの値について, 水工学論文集, 第45巻, pp.79-84, 2001.
- 14) 都市小流域における雨水浸透, 流出機構の定量的解明研究会: 都市域における水循環の定量化手法, 2000.

(2007.9.30受付)