

航空レーザー測量データを用いた地形解析による 内水浸水想定区域設定手法の開発

真下和彦¹・横田宏行²・岡山和生³・槇 朗⁴・
磯部裕介⁴・平岡 透⁵・恩田裕一⁶・末次忠司⁷

Development of Terrain Analysis Methods to Draw a Prediction Map of Landside Waters Inundation by Using LiDAR Data

Kazuhiko MASHITA¹, Hiroyuki YOKOTA², Kazuo OKAYAMA³, Akira MAKI⁴,
Yusuke ISOBE⁴, Toru HIRAOA⁵, Yuichi ONDA⁶ and Tadashi SUETSUGI⁷

Abstract

Terrain analysis methods to draw a prediction map of landside waters inundation by using LiDAR DEMs are developed for a municipality to draw it up easily. Several methods, such as an analysis of undulations of square-grid DEMs in settled ranges, an analysis of differences between mean and spot elevations, an analysis by extracting depressions, and an analysis by using topographic wetness index (TWI), that is composed of catchment area and slope, are numerically studied in a target area. And the method is presented to set a ratio of a predicted area to a target area by using the combined method of extracting depressions and TWI that shows the fair agreement with past inundated areas. And the usefulness of the method by extracting lower height original LiDAR data is confirmed.

Key words: *LiDAR, DEM, terrain analysis, prediction map of inundation, landside waters*

2011 年 6 月 9 日受付, 2011 年 9 月 21 日改稿, 2011 年 12 月 20 日受理

¹ 東洋建設株式会社

¹ Toyo Construction Co., Ltd., Aomi 2-4-24, Koto-ku, Tokyo, 135-0064, Japan

² 財団法人河川情報センター

² Foundation of River and Basin Integrated Communications, Kojimachi 1-3, Chiyoda-ku, Tokyo, 102-8474, Japan

³ 株式会社大林組

³ Obayashi Corporation, Konan 2-15-2, Minato-ku, Tokyo, 108-8502, Japan

⁴ 株式会社東京建設コンサルタント

⁴ Tokyo Kensetsu Consultants Co., Kitaotsuka 1-15-6, Toshima-ku, Tokyo, 170-0004, Japan

⁵ 大分工業高等専門学校

⁵ Oita National College of Technology, Oaza-maki 1666, Oita, Oita, 870-0152, Japan

⁶ 筑波大学

⁶ University of Tsukuba, Ten'nodai 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki, 305-8572, Japan

⁷ 山梨大学

⁷ University of Yamanashi, Takeda 4-3-11, Kofu, Yamanashi, 400-8511, Japan

1. 内水浸水想定区域図の必要性、及び課題

近年では、都市部への資産の集中や地下空間利用の進展など都市機能の高度化が進むとともに、ゲリラ豪雨等の増加に伴い、河川の堤防決壊や河川からあふれた水による外水浸水のほか、降雨が下水道、水路等により排除されないで氾濫したり、河川水位が高く水路等から河川への排水が出来ないことにより発生する内水浸水による被害が増大しており、内水による被害額が水害被害全体の過半を占めるまでに至っている（国土交通省，2009，p.6-7）。このような内水による浸水被害の軽減を図るため、内水による浸水と避難方法に関する情報を、住民に分かりやすく提供したり、平常時からの住民の防災意識の向上等を図るため、内水による浸水深、浸水範囲を表わす浸水想定区域図に避難所情報等を表示した内水ハザードマップの作成が国土交通省、地方自治体等により進められている。

内水浸水想定手法としては、降雨流出解析、及び氾濫解析により浸水区域を設定するシミュレーションによる手法が主体であるが、手法の簡素化を図るため、地盤高～浸水位関係などの地形情報を活用して浸水想定を行う手法や既往の浸水実績をもとに浸水想定を行う手法などが提示されている（国土交通省，2009，p.27-29）。

しかしながら、内水ハザードマップは、全国のおおよそ500市区町村で必要であるとされているが（国土交通省，2009）、平成23年3月28日現在146市区町村で作成・公表されているにすぎない（国土交通省ハザードマップポータルサイト）。この原因の一つは、内水ハザードマップの作成主体である市区町村は、財政基盤が脆弱であるとともに水理解析に関する技術力が必ずしも十分でないため、内水氾濫シミュレーションにより浸水想定区域図を作成することが容易ではなく、また、マップは住民の安全にかかわる重要な資料であり、浸水実績等を利用した簡略な手法の採用にも踏み切れないためである。

2. 地形解析手法の開発方針

河川の氾濫区域の詳細な地形状況を把握するため、航空レーザー測量による地盤高データの整備が、国土交通省地方整備局等により国管理河川の氾濫域を対象に全国的に進んでおり、現在、ほぼ整備が完了している。また、都道府県管理河川の氾濫域を対象に、国土地理院により整備が行われている。航空レーザー測量により取得された1～2mに1点ずつのオリジナル標高データは、樹木、工作物等のフィルタリングを行った後、5mグリッドの平均地盤高データとして整備されている。

内水氾濫については、外水氾濫と異なり他地域からの氾濫水の流入が殆どないため、下水道等の排水施設の機能を除けば、当該地域の地形的な要因により氾濫が発生すると考えられる。したがって、浸水の危険性を把握するためには、地形と浸水危険度との関係を把握することが重要である（地下空間における浸水対策検討委員会，2002，p.2.7）。

そこで、精度良く詳細な地形情報が得られる航空レーザー測量データを用いて、地形解

析により水害の危険性を推定する手法の研究開発を行った。

3. 地形解析手法の考案

航空レーザー測量データを用いて、メッシュ化された地盤高データを地形解析し浸水の危険性を推定する複数の手法を考案した。

(1) 低地度算定手法

浸水が発生する地点は、周辺地域より相対的に地盤が低いところであると考えられるので、一定範囲のメッシュ地盤高の相対的な高低比較により順序付けを行い、浸水危険性を判定する。具体的には、対象地域を正方形のメッシュに区画し、各判定対象メッシュ周辺の一定の比較対象範囲のメッシュに地盤高の高い方から順位を付け、判定対象メッシュの順位数を決める。次に全メッシュについて順位数の大きい方から一定の割合を浸水区域として判定する (Fig. 1)。(地下空間における浸水対策検討委員会, 2002, p. 2. 8-2. 9)

(2) 比較低地図法

低地度算定手法では、当該地点の地盤高を、周辺の各地点地盤高と相対的に高低比較し、浸水危険性を判定したが、本手法では、当該地点地盤高の周辺の平均地盤高との差の大小比較により、浸水危険性を判定する。具体的には、まず、周辺の一定範囲の地盤高を平均して当該メッシュ位置の平均地盤高を算定し、当該地点地盤高との差を比較高低差とする。次に、全メッシュについて比較高低差が大きい方から順位を付け、順位数の大きい方から一定の割合を浸水区域として判定する。

(3) 窪み地算定法

地形的に排水先の無い区域については、第一義的に内水浸水の危険性が高い地域であると考えられ、このような区域を抽出して浸水危険区域を設定する。具体的には、対象地域をメッシュに区画し、地盤高データを用いて、各メッシュについて周辺8メッシュとの高

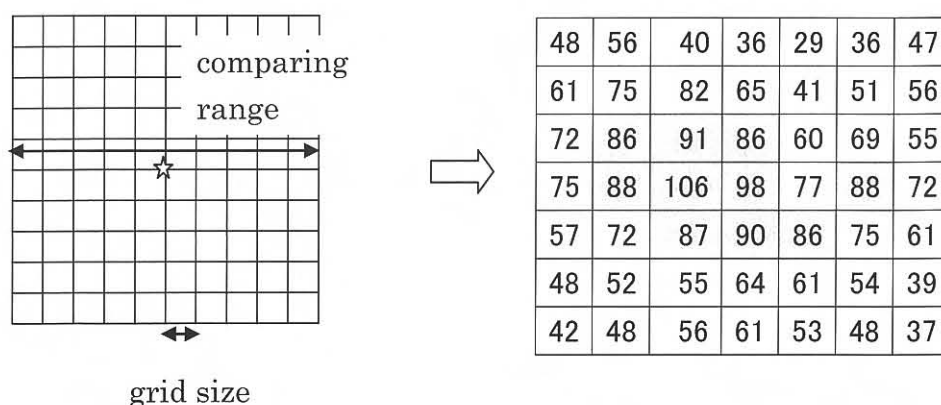


Fig. 1. The method by analysing undulations of grid DEMs in settled ranges.

低差比較により落水線を設定し、全ての隣接地より低いメッシュ、及び落水線が上記のメッシュに至るメッシュ（域外の排水先を持たない区域）を窪み地として抽出し、浸水区域を設定する。

（４）地形浸水指数（TWI）法

内水浸水のメカニズムは、対象地点に集まってきた降雨流出量と、その場所の地盤勾配等により規定される排水の容易さの程度により支配されると考えられる。地形浸水指数 TWI (Topographic Wetness Index) は、地下水流出による土地の湿潤状況を表わすために開発されたものであり (Wilson et al., 2000, p.5-11)、従来、長期的に湿潤な地域を推定するために用いられてきたが (井本ほか, 2005; 小栗ほか, 2005)、下記のように、集水面積が大きいほど、また、地盤の傾斜が緩いほど湿潤度が高まることを表わしているの、ここでは、浸水区域を推定する手法として活用を試みることにした。

$$W = \ln (A_s / \tan \beta)$$

W：地形浸水指数 (TWI), A_s ：集水面積, β ：地盤傾斜角

各メッシュの集水面積については落水線を設定して算定し、地盤勾配については、周辺 8 メッシュとの最急勾配を採用した。各メッシュについて、TWI 値が大きい方から順位を付け、一定の割合を浸水区域として判定する (Fig. 2)。

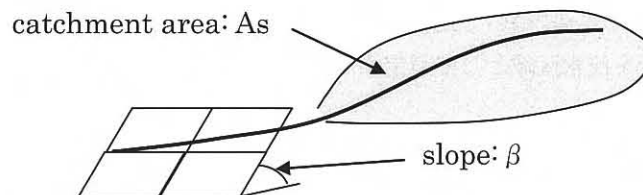


Fig. 2. The method by using topographic wetness index (TWI).

4. 地形解析手法の比較評価方法

各地形解析手法の適用性の比較検討にあたっては、過去の浸水実績を評価基準として用いることとした。浸水実績は、災害時の避難や、平常時の防災体制の確立等のために重要な情報であり、「内水ハザードマップ作成の手引き」においても、内水ハザードマップに過去の浸水実績を記載することを検討するとともに (国土交通省, 2009, p.67-68)、浸水実績を活用した手法により内水浸水想定区域図を作成しうよう規定されている (国土交通省, 2009, p.27-29)。このように、従来から、氾濫シミュレーションと並んで浸水実績は、内水浸水情報を与える基本的な情報として位置付けられている。

地形解析にあたっては、浸水実績のない区域をなるべく取り込まないで、精度良く浸水想定を行い、かつ、より多くの浸水実績を再現することが重要である。前者の観点から、

浸水想定区域の中の浸水実績の割合（浸水実績密度：Fig. 3 の④/②）を指標とし、後者の観点から、浸水実績区域のうち、地形解析により抽出される割合（浸水実績カバー率：Fig. 3 の④/③）を指標として検討する。

東京都北区周辺の地域（東西 8 km, 南北 6 km）において、各種手法を用いて地形解析のケーススタディを行うこととし、浸水実績は、東京都により調査された、昭和 49 年から平成 20 年までの期間内で、当該地域に浸水の発生した、16 洪水を対象とした（Table 1, Fig. 4）。これらの浸水は、集中豪雨、又は台風の接近により発生したもので、いずれの洪水も、内水浸水であり、隅田川、石神井川の氾濫による浸水は、報告されていない。

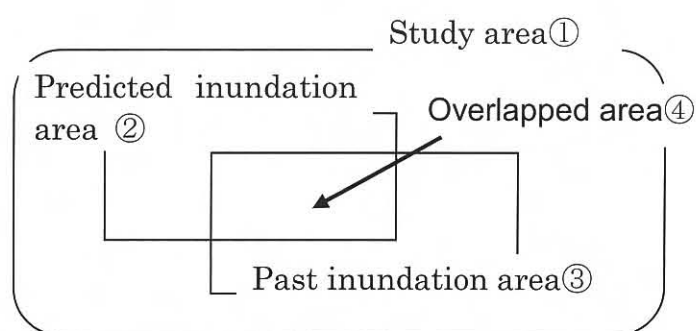


Fig. 3. Comparison of predicted and past inundation areas.

Table 1. Past inundation records in the study area. “Maximum rainfall” shows the maximum rainfall per 60 minutes after 1993 or maximum hourly rainfall before 1983 of rain-gauge stations near the study area.

Occurrence date		Cause of inundation	Maximum rainfall (mm)
2005	Sep. 4th	localized torrential rain	68
	May 15th	localized torrential rain	26
2000	Jul. 4th	localized torrential rain	43
	Sep. 11th	localized torrential rain	69
1999	Jul. 21st	localized torrential rain	34
	Aug. 24th	localized torrential rain	31
	Aug. 29th	localized torrential rain	52
1993	Jun. 21st	localized torrential rain	72
	Aug. 27th	a typhoon	55
	Nov. 13th	localized torrential rain	31
1983	Jun. 10th	localized torrential rain	17
1982	Jun. 20th	localized torrential rain	—
	Sep. 12th	a typhoon	21
	Nov. 30th	localized torrential rain	37
1981	Jul. 22nd	localized torrential rain	45
	Oct. 22nd	a typhoon	37

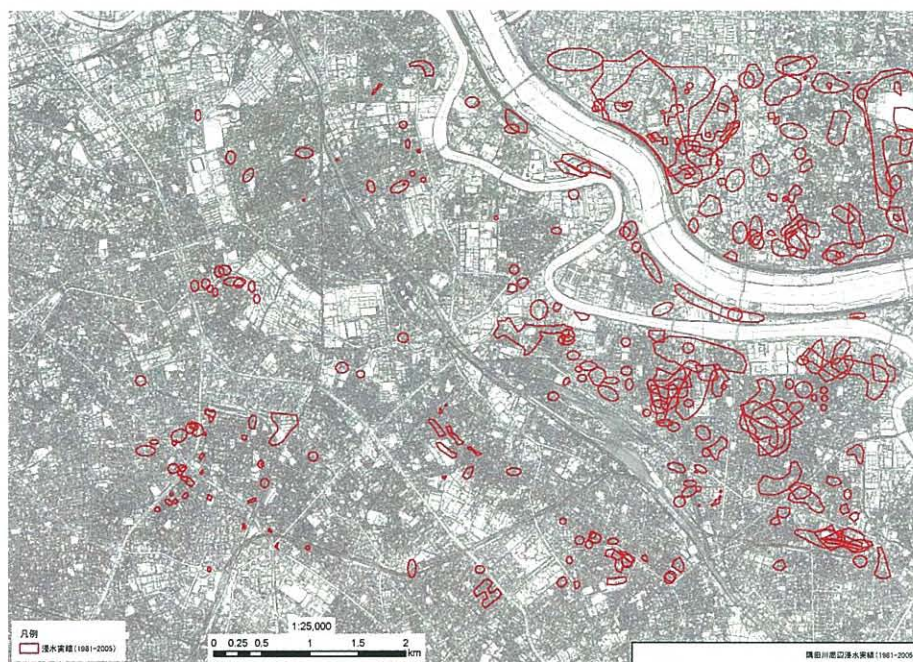


Fig. 4. Past inundation areas (1981~2005) in the study area.

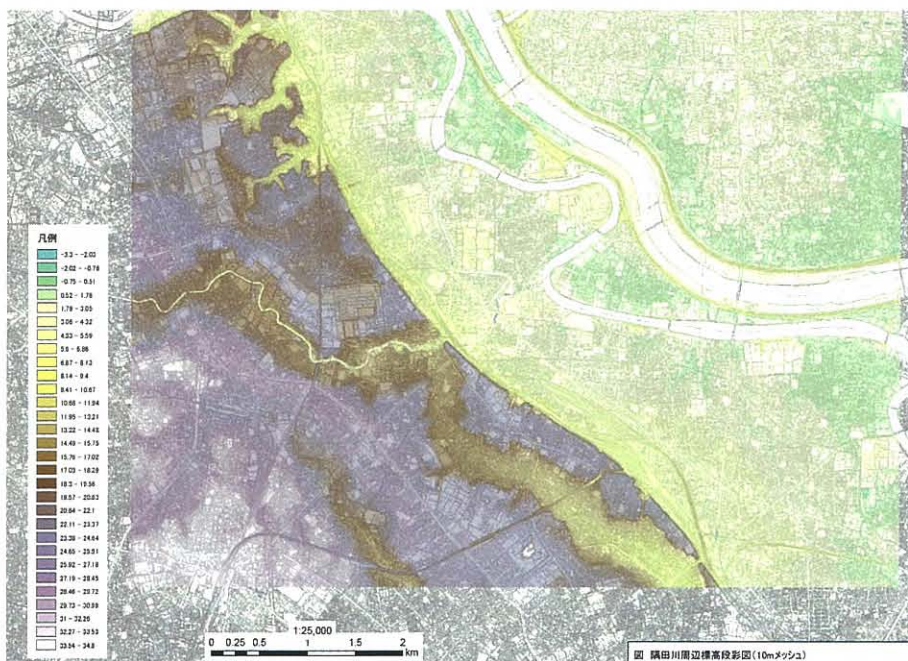


Fig. 5. The topographical map of digital elevation in the study area.

解析対象地域は、北西から南東に走る JR 京浜東北線を境にして、東北部は、荒川、隅田川が形成する低平な沖積平野で、西南部は、山の手丘陵地帯となっており、東西に隅田川支川の石神井川が流れている (Fig. 5)。

各手法の比較評価にあたっては、浸水実績の再現に地域的な偏りが無いことは別途配慮することとし、窪み地法を除く各手法の解析対象範囲に対する浸水想定区域面積の割合 (面積占有率: Fig. 3 の②/①) の設定をほぼ同一にして、検討する。

5. 各種地形解析手法を用いたケーススタディ

(1) 低地度算定手法による解析

比較対象範囲は、荒川と京浜東北線間の沖積平野の幅が 2 ～ 3 km 程度なので最大値を 4 km とし、抽出を目指す浸水想定区域の最小単位が 100 m 四方であるので、最小値は、1 km とした。メッシュサイズ 100 m、比較対象範囲 1000 m、及び 2000 m で解析を行い低地度約 80 % 以上の区域を浸水想定区域として抽出した結果を Fig. 6, Fig. 7 に示す。比較対象範囲 1000 m では、抽出区域は、離散的であり、山の手谷地や低平な沖積平野の一部が浸水想定区域として抽出されているが、2000 m では、荒川、隅田川周辺の抽出が増加する一方、山の手浸水区域が抽出されにくくなっている。比較対象範囲 4000 m で解析すると、荒川、隅田川周辺にまとまって浸水区域が抽出されるようになる。低地度算定手法による浸水想定区域と浸水実績を比較すると、浸水実績区域の内、約 30 % ～ 34 % が抽出されている (Table 2)。

(2) 比較低地図法による解析

低地度算定手法と同様の理由により、平均地盤高算定の対象範囲の最大値を 4 km、最小値を 1 km とした。メッシュサイズ 100 m、平均地盤高算定の対象範囲 2000 m で解析を行い、浸水危険性の高い方から約 20 % の区域を浸水想定区域として抽出したところ、山の手谷地、及び山の手と沖積平野の境界沿いの低平地が浸水想定区域として抽出された (Fig. 8)。対象範囲 1000 m で解析を行うと隅田川周辺の低平地が抽出されにくくなり、対象範囲 4000 m では、山の手浸水区域が抽出されにくくなる一方、隅田川周辺の低平地が浸水想定区域として広く抽出されるようになる。比較低地図法による浸水想定区域と浸水実績を比較すると、浸水実績区域の内、約 16 % ～ 24 % が抽出されている (Table 2)。

(3) 窪み地算定法による解析

窪み地法により、100 m メッシュで解析した結果を示す (Fig. 9)。山の手地域、及び沖積平野とも、窪み地として浸水想定区域が抽出されている。窪み地法による浸水想定区域と浸水実績を比較すると、解析対象範囲に対する浸水想定区域の占有率約 11 % で、浸水実績区域の内約 17 % が抽出されている (Table 2)。

(4) 地形浸水指数 (TWI) 法による解析

TWI法により、メッシュサイズ 100 m で解析を実施し、TWI 値が大きい約 20 % の区域を

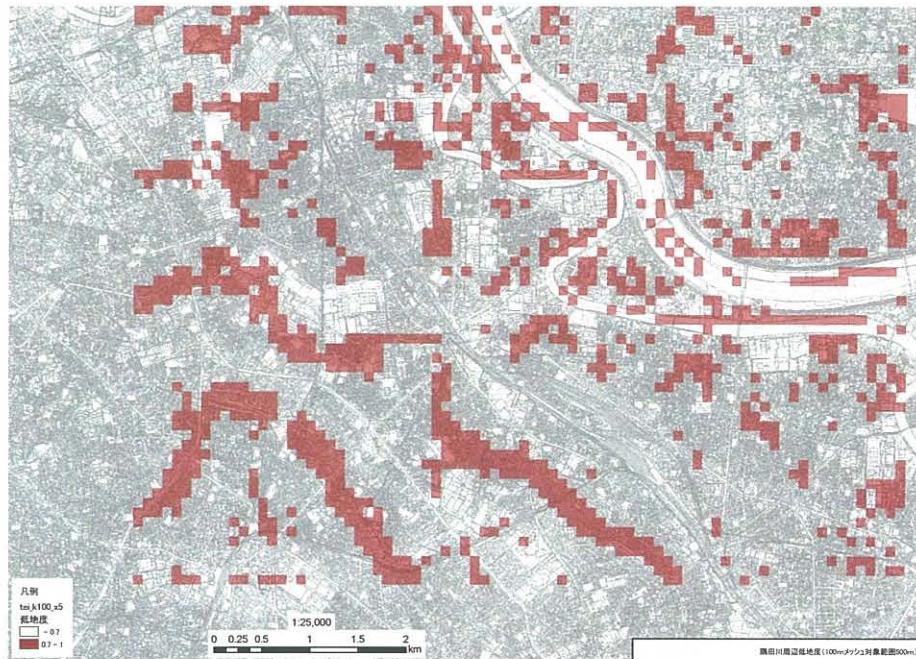


Fig. 6. The analysis result of undulations of grid DEMs (grid size 100 m, window size 1000 m×1000 m, set extracting ratio 20%).

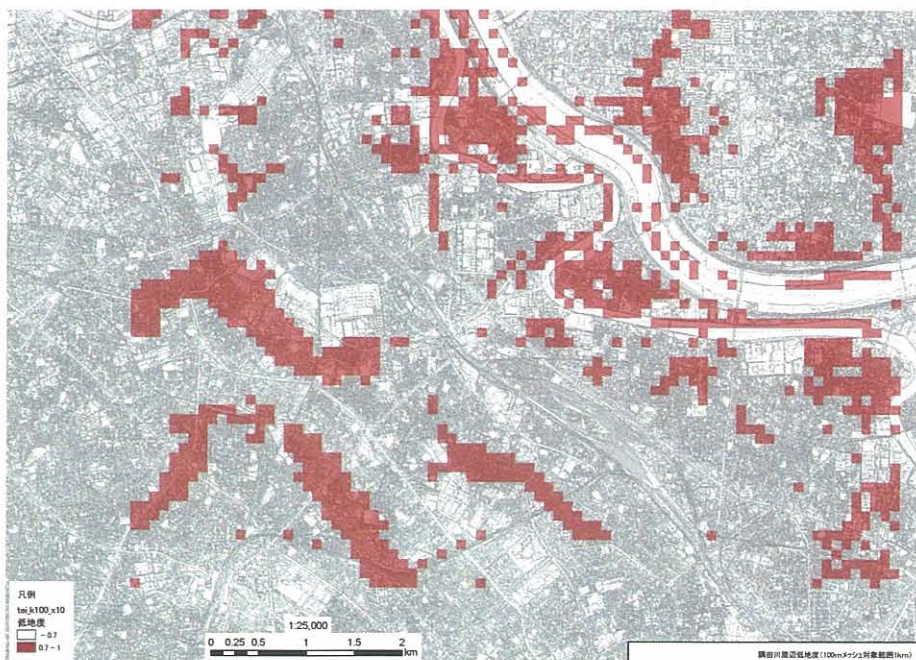


Fig. 7. The analysis result of undulations of grid DEMs (grid size 100 m, window size 2000 m×2000 m, set extracting ratio 20%).

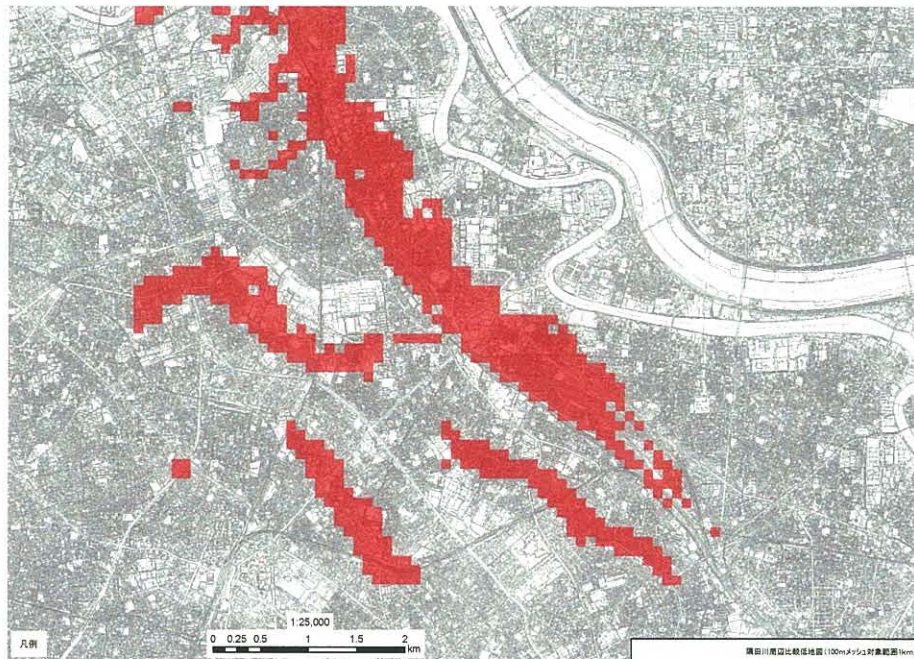


Fig. 8. The result of the study by analysing differences between mean and spot elevations (grid size 100 m, window size 2000 m×2000 m, set extracting ratio 20%).

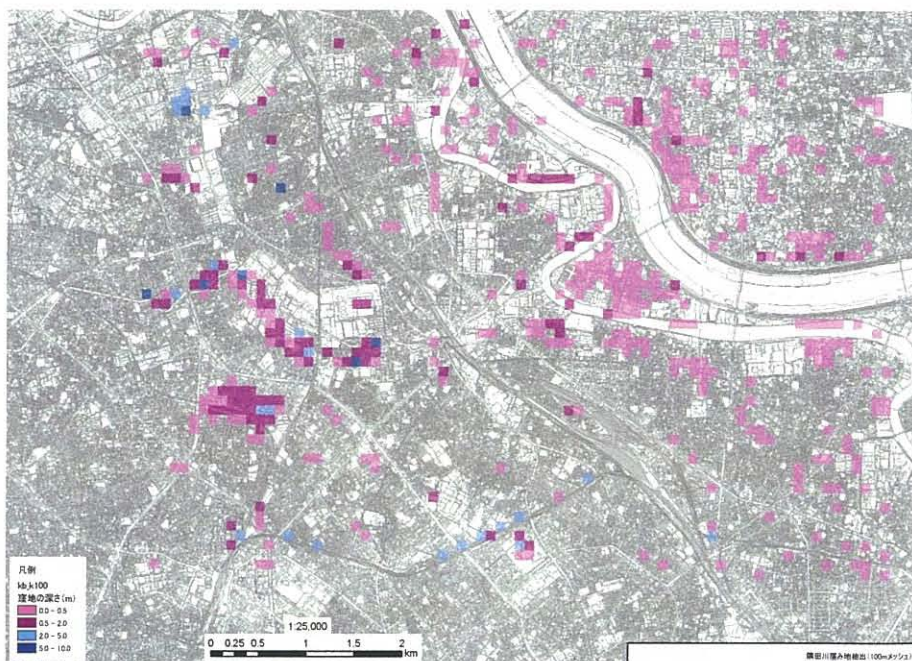


Fig. 9. The result of the study by extracting depressions (grid size 100 m). Depressions less than 0.5 m are shown in purple, from 0.5 m to 2 m in reddish purple, and more than 2 m in blue.

Table 2. Predicted and past inundation areas, and their overlapped areas by terrain analysis methods (grid size 100 m).

Methods	Predicted inundation area		Overlap of predicted and past inundation areas		
	Area ② (km ²)	Ratio to study area ② / ①	Area ④ (km ²)	Ratio to predicted inundation area ④ / ②	Ratio to past inundation area ④ / ③
undulations of grid DEMs method (window size 1000 m, extracting ratio; 20%)	10.6	22.1%	3.9	36.8%	31.7%
undulations of grid DEMs method (window size 2000 m, extracting ratio; 20%)	10.5	21.9%	4.2	40.0%	34.1%
undulations of grid DEMs method (window size 4000 m, extracting ratio; 20%)	9.5	19.8%	3.7	38.9%	30.1%
differences between mean and spot elevations method (window size 1000 m, extracting ratio; 20%)	9.4	19.6%	2.0	21.3%	16.3%
differences between mean and spot elevations method (window size 2000 m, extracting ratio; 20%)	11.8	24.6%	3.0	25.4%	24.4%
differences between mean and spot elevations method (window size 4000 m, extracting ratio; 20%)	10.0	20.8%	2.0	20.0%	16.3%
extracting depressions method	5.1	10.6%	2.1	41.2%	17.1%
TWI method (extracting ratio; 20%)	9.9	20.6%	4.0	40.4%	32.5%
Study area ① : 48 km ²			Past inundation area ③ : 12.3 km ²		

浸水想定区域として示した (Fig. 10). 山の手の谷地とともに, 隅田川周辺の低平地が浸水想定区域として良く抽出されている. TWI 法による浸水想定区域と浸水実績を比較すると, 浸水実績区域の内約 33 % が抽出されている (Table 2).

(5) 各手法の比較評価

低地度算定手法, 比較低地図法, 窪み地算定法, 及び地形浸水指数 (TWI) 法の各手法により北区周辺地域において, ケーススタディを行った結果 (Table 2), 窪み地法, TWI 法, 及び低地度算定手法による浸水想定区域内の浸水実績密度 (Table 2 の④/②) が 40 % 程度で, 比較低地図法では, 20 % 台と低くなった. 浸水実績カバー率についても, TWI 法, 及び低地度算定手法では, 30 % ~ 34 % 程度であったが, 比較低地図法では, 20 % 前後であった. 尚, 窪み地法については, 落水線解析により, 直接, 浸水想定区域を抽出する場合, 浸水想定区域の面積は一義的に定まり, 面積占有率の設定を変えることができない

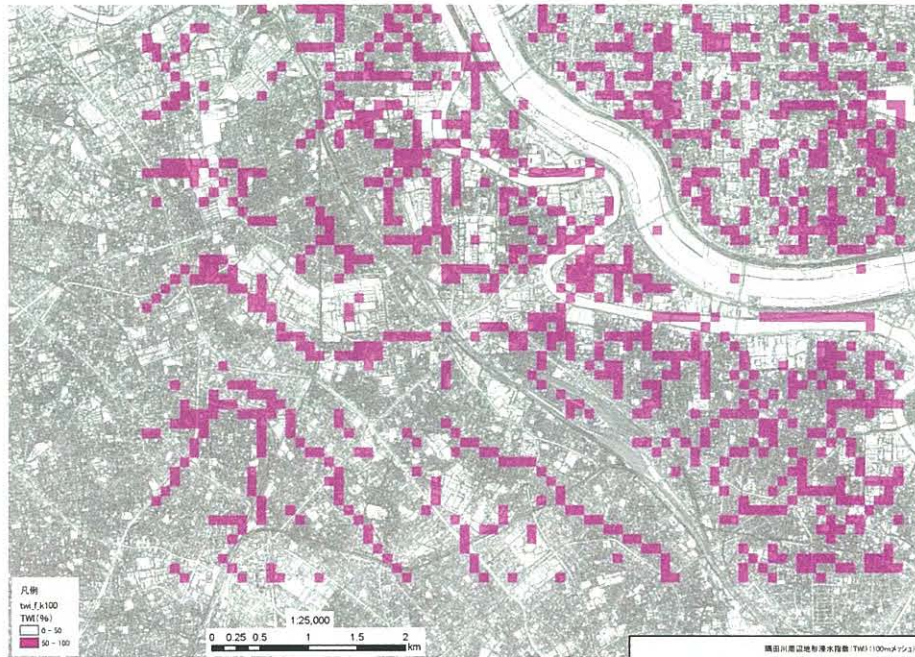


Fig. 10. The result of the study by using topographic wetness index (grid size 100 m, set extracting ratio 20%).

いので、浸水実績カバー率の比較検討は行っていない。

また、低地度算定手法、及び比較低地図法については、比較対象範囲の設定値により浸水想定区域として表示される地域が、かなり変動する。

(6) 修正窪み地—TWI 法による解析

浸水実績を比較的良好に抽出でき、また、推定結果が安定している窪み地法、及び TWI 法を用いて、面積占有率の値を変化させ、適切な面積占有率を設定する手法の検討を行った。

TWI 法は、集水面積と地形勾配の比率により浸水想定区域を設定するものであるが、窪み地については、地形勾配が無限に小さくフラットな地域であるので、TWI 値が無限に大きくなる特異なケースであると考えられる。窪み地法と TWI 法は手法的に相補いあうものであり、地形解析により内水浸水想定区域を設定する場合には、窪み地法と TWI 法を組み合わせることで表示することが望ましいと考えられる。

窪み地法において、100 m メッシュで解析を行うと、小さな起伏が連続していて比較的浸水しやすい低平地が抽出されにくい。一方、10 m メッシュでは、微細な窪み地がそのまま表現されて浸水区域が判別しにくい。また、TWI 法において、100 m メッシュで解析を行うと、微地形の起伏による浸水区域の情報が抜け落ちてしまう。一方、10 m メッシュでは、細かい谷筋が表現されてしまい、広域的な特徴が表わされにくい。そこで、まず、

10 m メッシュで計算を行って浸水危険性が高いメッシュを抽出し、更に、100 m メッシュを対象にして、その中に属する浸水危険性が高いと判定された 10 m メッシュの割合により浸水想定区域を設定する。

ケーススタディとして、まず、窪み地法、及び TWI 法それぞれについて、面積占有率を 20 %～60 % と設定して算定し、次に、両手法の区域を重ね合わせて地形解析による浸水想定区域図を作成した。重ね合わせた浸水想定区域の面積占有率は 34.2 %～82.7 % となっている (Table 3)。

地形解析による浸水想定区域と浸水実績を比較すると、窪み地法、及び TWI 法それぞれの解析対象範囲に対する浸水想定区域の占有率の設定値を増大させることにより、浸水実績カバー率が增大するが (Table 3 の $b = ④ / ③$)、一方、浸水想定区域内の浸水実績密度は減少していき (Table 3 の $a = ④ / ②$)、推定精度が低下していくと考えられる。しかし、いずれの面積占有率設定においても、浸水想定区域内の浸水実績密度の方が、非浸水想定区域内の浸水実績密度 (Table 3 の $(③ - ④) / (① - ②)$) を上回るとともに、調査対象区域全体の浸水実績密度 ($12.3 \text{ km}^2 / 48 \text{ km}^2 \times 100 = 25.6 \%$) を上回っている。

ここで、各面積占有率設定による浸水想定区域推定結果を比較評価するため、推定精度、及び浸水実績のカバー率を複合的に対象とする指標 $a \times b$ を導入し検討する。Table 3 に示す通り、5 ケースの検討結果を比較すると、面積占有率 71.9 % のケース (Fig. 11) で $a \times b$ が最大となり、この解析結果を用いて、浸水想定区域図を作成することが有益であることを示している。

Table 3. Predicted and past inundation areas, and their overlapped areas by the combined method of extracting depressions and TWI.

Set ratio of predicted inundation areas to a study areas (extracting depression method / TWI method)	Predicted inundation area by combined method		Overlap of predicted and past inundation areas				Ratio of past inundation area without overlapped area to study area without predicted inundation area $(③ - ④) / (① - ②)$
	Area ② (km ²)	Ratio to study area ② / ①	Area ④ (km ²)	Ratio to predicted inundation area $a = ④ / ②$	Ratio to past inundation area $b = ④ / ③$	Combined index $a \times b$	
20%	16.4	34.2%	6.6	40.4%	53.9%	0.218	18.0%
30%	22.9	47.6%	8.4	36.6%	68.0%	0.249	15.5%
40%	28.9	60.2%	9.7	33.6%	78.8%	0.265	13.6%
50%	34.5	71.9%	10.7	31.0%	87.0%	0.270	11.9%
60%	39.7	82.7%	11.4	28.7%	92.7%	0.266	10.8%
Study area ① : 48 km ²			Past inundation area ③ : 12.3 km ²				

6. オリジナルポイントデータを用いた浸水想定区域の推定

これまでの解析は、航空レーザー測量による5 mメッシュのグリッドデータを用いてきたが、フィルタリングによるある程度の誤差は、避けられないものと考えられる。

したがって、ここでは、地物を含めた現地の状況を直接表わしているオリジナルポイントデータを用いて浸水危険性の高い区域の抽出を試みる。

荒川区付近（東西2 km、南北1.5 km）において、オリジナルポイントデータのうち標高が低位から7 %のデータを抽出し Fig. 12 に示す。同図には、過去の浸水実績も示す。抽出されたオリジナルポイントデータは、図郭内に113,045 個存在するが、その内、53 %が浸水実績区域と重なっており、浸水実績区域の図郭内の面積比率24 %と比べてかなり高く、面的浸水想定情報は提示されないものの、低位のオリジナルデータを抽出することにより浸水危険性の高い区域を示す手法の有効性が確認できる。

7. 結 語

東京都北区周辺のケーススタディにより、浸水想定区域設定手法として、窪み地法、TWI 法、低地度算定手法等の航空レーザー測量データを用いた地形解析手法が有効であることを示すとともに、窪み地法とTWI法を組み合わせた手法を用いて、対象とする区域のうち浸水想定区域として表示すべき面積の割合（面積占有率）を決定する手法を提示した。今後、さらに、他の地域を対象として検証を重ねるとともに、浸水実績、及び浸水シミュレーション結果との比較検証を合わせて行い、手法の向上を図る必要がある。また、オリジナルポイントデータによる解析との併用手法についても検討を進めていく必要があると考えている。

謝 辞

本研究は、真下、及び岡山が財団法人河川情報センター在籍時に実施したものであり、同センターの方々から多くのアドバイスをいただきました。また、国土交通省水管理・国土保全局（前都市・地域整備局）下水道部流域管理官室、同水管理・国土保全局（前河川局）河川環境課河川保全企画室（前・治水課河川保全企画室）、国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究室、及び、同水害研究室の方々に、行政上のニーズや研究の方向性について数々のご指導をいただきました。航空レーザー測量データ、浸水実績等の資料については、国土交通省関東地方整備局河川部河川管理課、及び、東京都建設局河川部計画課から御提供をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

なお、Fig. 4～Fig.12の基図は、東京デジタルマップ株式会社から提供を受けたものです。

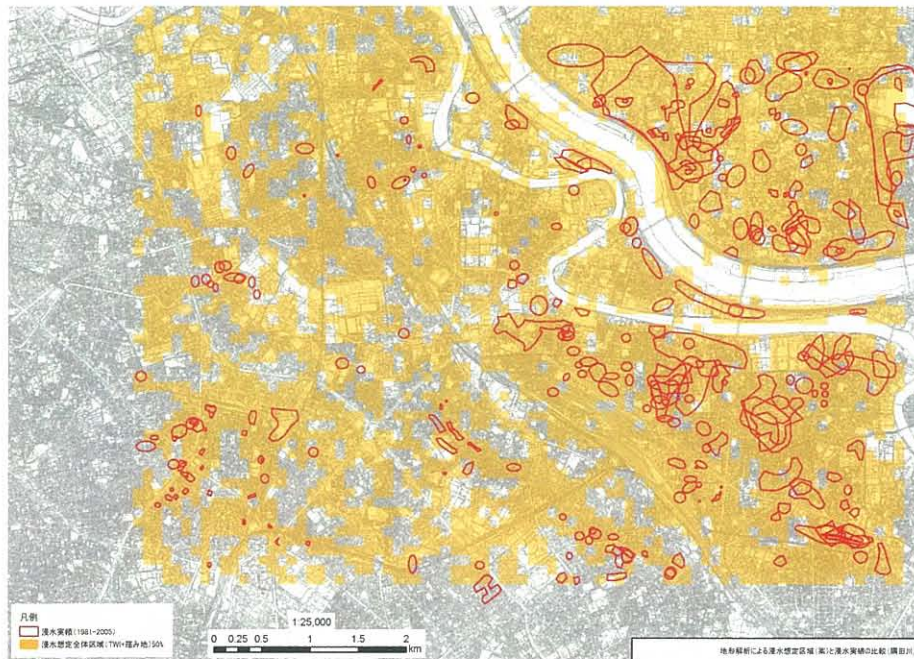


Fig. 11. The result of the study by the combined method of extracting depressions and using topographic wetness index (grid size : first 10m, second 100m) are shown in yellow. Past inundation areas are shown in enclosed red curves.

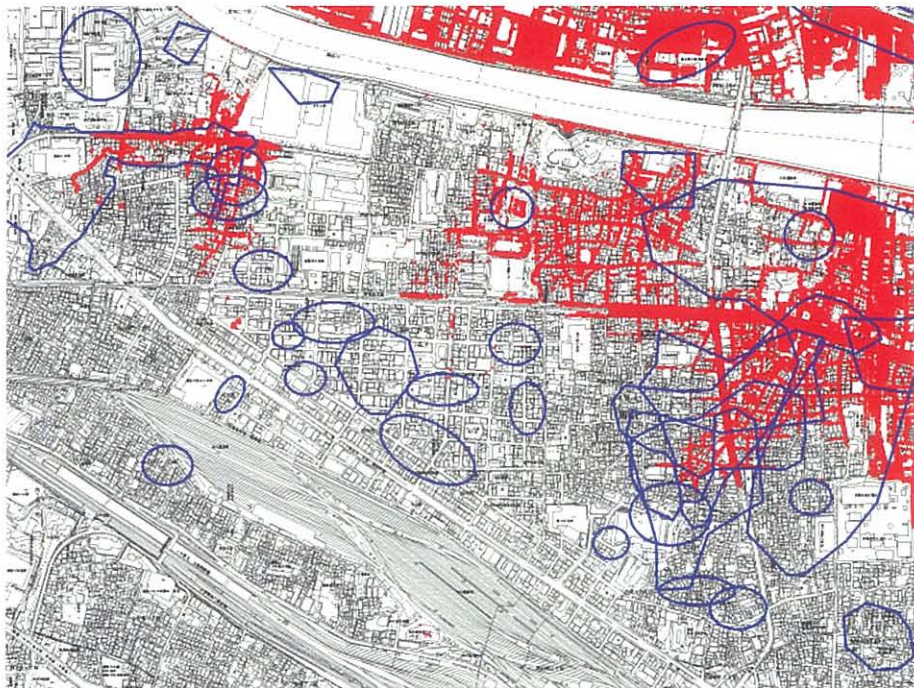


Fig. 12. Lower height original LiDAR data (7%, shown in red dots) and past inundation areas (shown in enclosed blue curves) in the study area.

引用文献

- 地下空間における浸水対策検討委員会（2002）地下空間における浸水対策ガイドライン同解説, 2.7, 2.8-2.9
- 井本郁子・大江栄三・藤原宣夫・畠瀬頼子・小栗ひとみ・百瀬 浩・宇津木栄津子・名取 睦（2005）国営みちのく杜の湖畔公園における GIS を使用した林床植物の分布予測による自然資源評価：ランドスケープ研究, 68, 637-642
- Wilson, J. P. and Gallant, J. C. (2000) *Terrain Analysis, Principles and Applications*: John Wiley & Sons, Inc., 5-11
- 国土交通省ハザードマップポータルサイト URL: <http://disaportal.gsi.go.jp/>
- 国土交通省都市・地域整備局下水道部（2009）内水ハザードマップ作成の手引き（案），巻頭, 6-7, 27-29, 67-68
- 小栗ひとみ・畠瀬頼子・藤原宣夫・百瀬 浩・井本郁子・大江栄三・宇津木栄津子（2005）大規模丘陵地公園における環境管理計画のための環境の総合評価：ランドスケープ研究, 68, 643-646