

# 鉄道沿線における局地的短時間豪雨時の 流出・氾濫影響評価手法

渡邊 諭\* 湯浅 友輝\* 馬目 凌\*

Simulation Method of Runoff-inundation around Railway Lines by Localized Downpour of Short Duration

Satoshi WATANABE Tomoki YUASA Ryo MANOME

Recently, due to local torrential rainfall events with high intensity which generate within a short time, flooding and inundation from rivers have caused disasters in urban area, and the number of these disasters has been increasing. Japan railways often restrict train operation because of the precipitation and the river water level. However, the operational service management method that takes into consideration the flooding and inundation phenomenon to occur within a short time has not yet been established. Therefore, it is necessary to develop a real-time rainfall runoff -inundation simulation method considering predicted rainfall in the near future. This paper reports the examination result of the validity of the proposal simulation method.

キーワード：流出解析，氾濫解析，河川，数値標高モデル，数値地形精度

## 1. はじめに

近年の地球規模の気候変動により，国内においても短時間で局地的に記録的な豪雨が発生する事象が頻発し，都市部では河川の氾濫による浸水や内水氾濫による道路冠水などの被害が増加している。

鉄道では，主に雨量や河川水位の観測値を用いて所定のしきい値に基づく運転規制を実施することにより安全輸送を図っている。しかし，短時間で急激に発達する局所的豪雨は10数キロの範囲で発生し，さらに短時間で数キロメートルを移動する。そのため，局所的豪雨に伴い短時間中に発生する氾濫・浸水現象を現状の観測体制で捉える事は困難であり，それらの氾濫・浸水現象が列車や旅客に及ぼす影響を考慮した運行管理手法は確立していない。

一方，気象観測・予測技術の発達によって最近では1～2時間先の雨域や降雨量の変化を高精度で予測することが可能となっている<sup>1)</sup>。そこで本研究では，列車の運行管理<sup>2)</sup>に資するため，局地的な豪雨を対象に数十分から数時間先の気象予測値を外力条件として氾濫・浸水ハザードを運行管理にリアルタイムに利用する手法の開発を目指している<sup>3)</sup>。本稿では，災害ハザードの解析に用いた流出・氾濫解析手法の概要とともに，氾濫域の評価として許容できる数値地形精度の検証による妥当性の検討結果について報告する。また，システム化にあたっての計算時間に関する検討も合わせて述べる。

## 2. 流出・氾濫解析手法の概要

### 2.1 流出・氾濫解析手法の概要と前提条件

流出・氾濫解析での計算の流れを図1に示す。解析モデルは数値標高モデル（以下，DEMという）を基本とし，断面形状を再現した河川がDEM上にモデル化されている（以下，河川モデルという）。外力条件である任意の降雨をDEM上に与え，その雨水は地形の傾斜に沿って河川モデルに流れ込む（図中の①流域解析）。河川モデルにおいて雨水の流入量から河川流量と水位を逐次計算し，豪雨によって河川流量が増加して河川の水位が岸の高さを超えると越流する（図中の②河川の解析）。越流した雨水はDEMの形状に従って拡散あるいは湛水する（③氾濫解析）。

本解析において対象とするのは，降雨に伴う河川の流出解析と，河川から溢れた氾濫水のみを追跡する外水氾濫事象であり，下水道設備からの氾濫による内水氾濫は考慮していない。また，雨水は全て地形に沿って河川へ

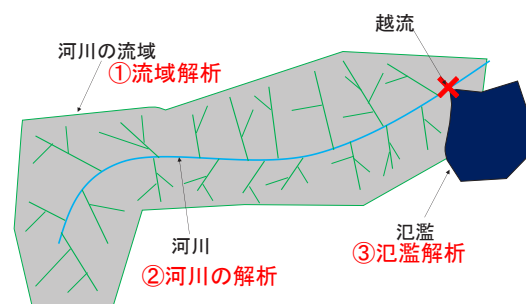


図1 流出解析のイメージ図

\* 防災技術研究部 地盤防災研究室

特集：防災技術

流下し、地中への浸透は考慮しない。これらの制限は、可能な限り簡易なモデルを構築し計算リソースを小さくしてリアルタイム性を確保すること、通常の降雨規模以上の顕著気象を対象とすることから下水道設備が十分機能しない状況を想定して安全側の評価とすること、を前提としたためである。

2.2 流出・氾濫解析モデル

流域解析における流出現象は、キネマティックウェーブモデルとよばれる分布型流出モデル<sup>4)</sup>を用いている。斜面中を流下する単位幅流量  $q$  と水深  $h$  との関係は、式(1)で表される。

$$q(h) = \sqrt{\frac{i}{n_{slope}}} \cdot h^m \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(t) \quad (2)$$

ここで、 $i$ ：地表面勾配、 $n_{slope}$ ：地表面等価粗度、 $m$ ：定数、であり  $x$  は斜面流下方向を示す。この式と式(2)で表わす連続式を組み合わせることで差分法により雨水を追跡する。ただし、 $r(t)$ ：降雨強度である。

次に河川の解析であるが、上述の手法で算出される河川に流れ込む雨水は、下記に示す式(3)～(5)で表わされ、一次元不定流として下流方に流下する。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{T_r}{\rho} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{T_r}{\rho} = \frac{gQ|U|}{R^{4/3}} \left( \frac{\sum_i P_{wi} n_i^{3/3}}{\sum_i P_{wi}} \right)^{4/3} \quad (5)$$

ここで、 $A$ ：通水断面積、 $Q$ ：流量、 $U$ ：流速、 $H$ ：水位、 $g$ ：重力加速度、 $n_i$ ：区間  $i$  におけるマンニングの粗度係数、 $P_{wi}$ ：区間  $i$  における潤辺長、 $R$ ：径深であり、 $x$  は河川

横断方向を、 $z$  は鉛直方向を、 $y$  は流下方向を示す。このとき、河川横断面において流下させることのできる限界流量を超えた場合に氾濫が発生する。

氾濫解析において、氾濫水は式(6)～(8)に示す二次元不定流解析によって地表面を流下するものとする<sup>5)</sup>。この計算手法はエネルギー解析法に基づく運動方程式について、場の加速度、慣性項、水面勾配項、抵抗項を考慮した計算を実施する。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = Q_m \quad (6)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (7)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (8)$$

ここで、 $Q_m$ ：系に流入または系から流出する流量、 $h$ ：水深、 $t$ ：時間、 $M$  および  $N$ ： $x$  および  $y$  方向の流量フラックス ( $M=uh$ ,  $N=vh$ )、 $u$  および  $v$ ： $x$  および  $y$  方向の流速、 $g$ ：重力加速度、 $\rho$ ：水の密度、 $n$ ：氾濫原粗度係数である。なお、式(7)、式(8)の左辺第二項、第三項は移流項である。

3. 流出・氾濫解析モデルの妥当性の検証

3.1 解析対象エリアと対象降雨

鉄道沿線において過去に近傍の河川の氾濫により浸水の履歴がある箇所を解析対象エリアとし、上述の流出・氾濫解析モデルを適用して自治体による浸水予想区域図と比較することでその妥当性を検証する。

図2に、対象解析エリアの概要を示す。対象とする河川は流路延長 25.2km、流域面積 61.6km<sup>2</sup> で東西方向に流下する河川であり、鉄道は河川の流下方向とほぼ平行に流下している。なお図中に示した流域の範囲は鉄道が横断する河川の上流側の流域のみを示している。下流方についてはモデル化しておらず、流末に達した雨水は消散する境界条件とした。図に示すように、鉄道は東側の

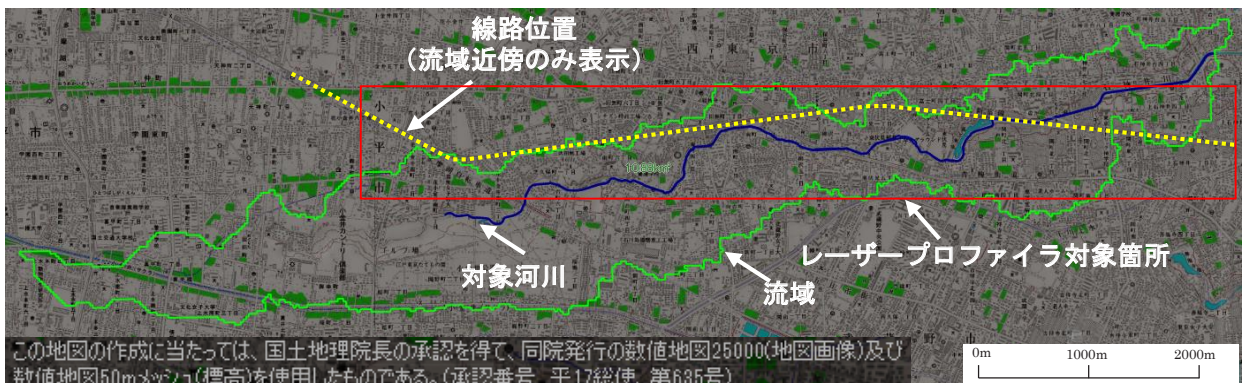


図2 対象解析エリアの概要図

1箇所では橋梁により河川と交差している。数値標高モデルは、図中の赤線部分はレーザープロファイラにより数値地形精度1mの数値標高モデルを取得し、その他の箇所については国土地理院の整備する数値標高モデル（数値地形精度5m）を用いて両者を統合した数値地形により解析を行った。

外力条件としては、図3に示すH12年9月に発生した東海豪雨（総雨量589mm，時間最大雨量114mm）を流域全体に作用させ、数値地形精度をパラメータとして5，10，25，50，100mと変化させて流出・氾濫解析を実施した。東海豪雨を外力条件としたのは、後述する自治体による浸水予想区域図が同降雨を外力条件として作成されているためである。

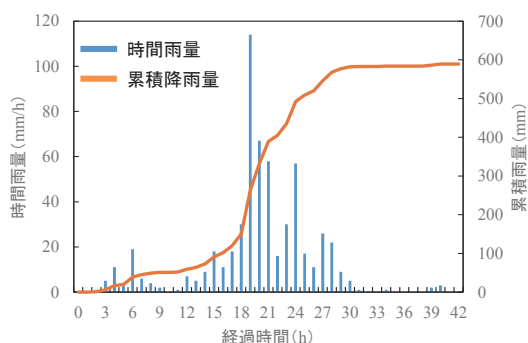


図3 外力条件（東海豪雨）

### 3.2 既往の浸水予想区域図との比較

#### 3.2.1 流域全体の比較

前節で述べた流出・氾濫解析で求めた浸水範囲を同河川流域において自治体が作成した浸水予想区域図<sup>6)</sup>に示された浸水範囲と比較し、解析結果の妥当性を検証した。なお、自治体による浸水予想区域図は、場所ごとに

降雨期間中に発生する内水および外水氾濫のうち最大浸水深を示しており、数値地形精度は50mとなっている。そこで、本解析における降雨期間中の場所ごとの最大浸水深を同様に算出し、主に河川近傍の範囲に着目して比較した。

図4は、各数値地形精度における最大浸水深および浸水範囲と、自治体による浸水予想区域図を示したものである。

数値地形精度100mの結果をみると浸水範囲、最大浸水深ともに自治体による浸水予想区域図よりも小さく評価されており、図中A，B，Cのように浸水が1mを超える箇所についても最大浸水深、浸水範囲ともに一致していない。数値地形精度50mではB，Cの最大浸水深、浸水範囲を大きく評価する一方で、Aを小さく評価しており、全体の浸水範囲に大きな差はないものの最大浸水深の評価に差があることが分かる。

数値地形精度5，10，25mでは、流域全体でみて自治体による浸水予想区域図と同様にA，B，C箇所を相対的に大きく評価している。また、Aが2.0m以上の範囲を大きく含むこと、Bが1.0～2.0mの範囲が主体であること、Cが0.5～1.0mが主体であることなど最大浸水深の規模とともに浸水範囲も概ね一致している。特にAの位置では、地形による特有の浸水形状が再現されている。ただし、浸水深は全体的にやや浅めに評価している。これは解析における河川の初期水位を0mとしているため実際より氾濫水を過少な評価する可能性があることや、自治体による浸水予想区域図では河川の氾濫原近くにおいても内水氾濫の影響により最大浸水深が深くなっている可能性があること、などが考えられる。

以上のことから、数値地形精度が25m以下であれば、最大浸水深はやや浅めに再現されるものの浸水範囲は自

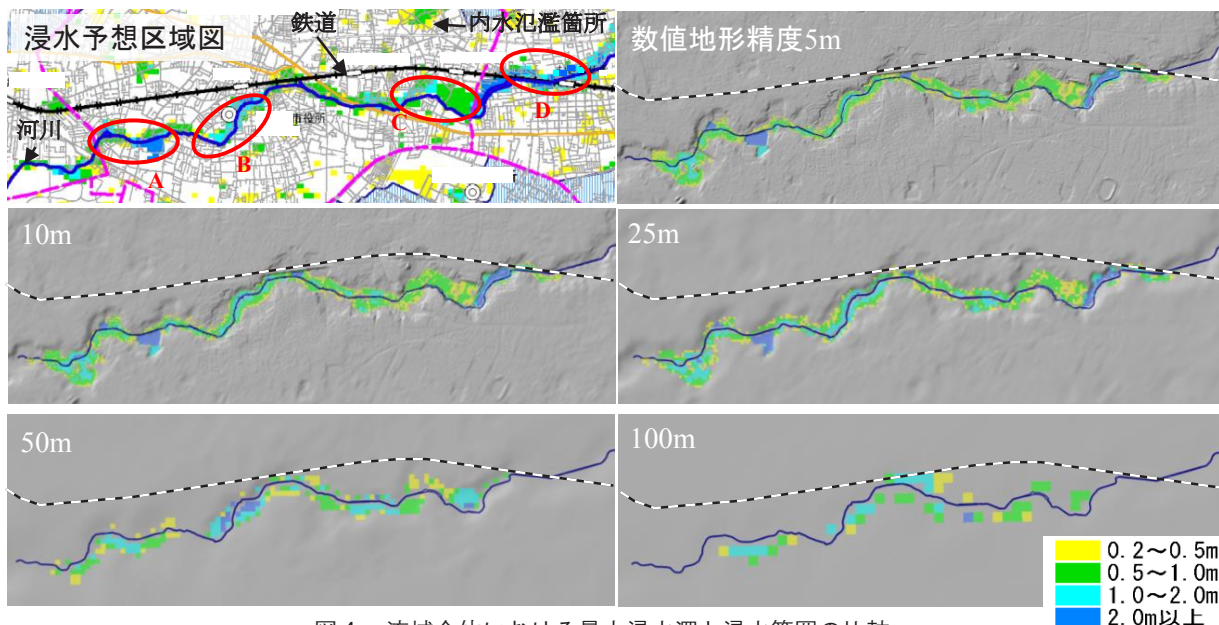


図4 流域全体における最大浸水深と浸水範囲の比較

特集：防災技術

自治体による浸水予想区域図と大きな差はなく概ね一致する結果が得られることが分かる。

3.2.2 下流方における浸水範囲の比較

前項の図4において、線路より下流方のDをみると、いずれの解析結果も湛水範囲が過少評価されている。同箇所付近を拡大し、数値地形精度25m以下の結果と比較したものが図5である。また、最大浸水深の凡例として0.2m以下を追加して示している。

図より、線路より上流側の線路沿線の浸水範囲（図5中の範囲i）については、自治体による浸水予想区域図より概ね1～2メッシュ（50～100m）程度の誤差で一致している。一方、線路より下流側の線路沿線の浸水範囲（図4中の範囲ii）をみると、浸水予想区域図では範囲iの範囲のほぼ全域において浸水が発生しているが、解析結果をみると範囲iiにおいては数値地形精度5mお

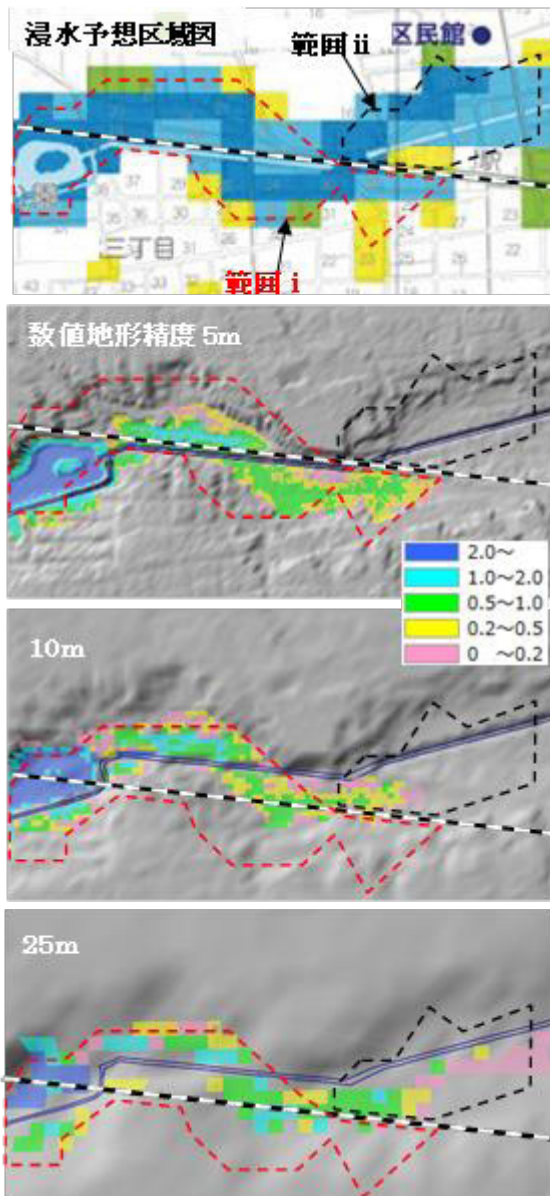


図5 図4中のD付近の拡大図

よび10mでは浸水が発生していない。また、数値地形精度25mでは線路と河川に挟まれた部分のみ浸水が発生したものの浸水深は0.2m以下であり、数値地形精度が粗くなったことで範囲iと範囲iiの間に存在する微少な凸形状が均されて氾濫水の拡散が生じたものである。

いずれにしても範囲i、範囲iiのほぼ全域において解析結果は浸水予想区域図よりも浸水範囲が狭く最大浸水深も小さく評価されている。この原因として、解析では図2で示した流域よりも下流側の流域および河川は再現していないことから、下流方の河川の水位上昇による背水（バックウォーター）の影響や前述のとおり内水氾濫を考慮していないため、結果として河川流量と氾濫水を過少評価していると考えられる。これに加えて、本解析における数値地形精度は自治体による浸水予想区域図の1/2以下であり、より詳細な地形標高に対応した浸水範囲を示しているため、結果的に浸水範囲が狭くなったと考えられる。

3.3 高精度数値標高モデルによる計算事例との比較

図2で示したように、流域中にはレーザープロファイラにより高精度の数値標高モデルを取得している箇所がある。そこで、現状で実施可能な最も再現精度の高い計算結果を算出し、その解析結果を最も現実に近い値と仮定し、数値地形精度を低下させた場合の解析結果にどの程度の誤差が生じるか確認した。解析条件として数値地形精度を1mとし、さらに図6で示すように実際の建造物等の高さを表現した数値表層モデル（以下、DSMという）を用いて、3.2節で示した事例と同様の外力条件で解析を行った。なお、数値地形精度5mのDEMの範囲では、1mにリサンプリングしたものをを用いている。

図7は、数値地形精度1mを基準として、数値地形精度5、25、50および100mの解析結果について、図4中のC部分を拡大して示すとともに、参考として同箇所の航空写真を示したものである。地形との比較のため、背景にグレースケールで表示している地形は全て数値地形精度1mのDEMである。

基準となる1mメッシュの結果をみると、建物と建物の間の道路、幅員の広い道路部分およびグラウンド等の範囲が浸水しており、最大浸水深1.0～2.0m規模の範囲が広く分布していることが分かる。航空写真および背

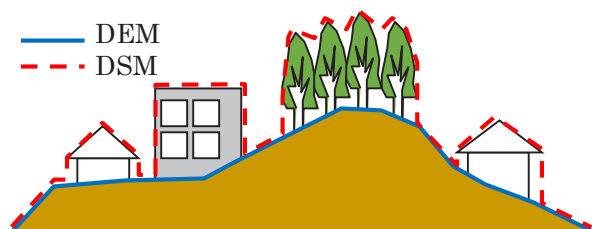


図6 DSMとDEMの概念図

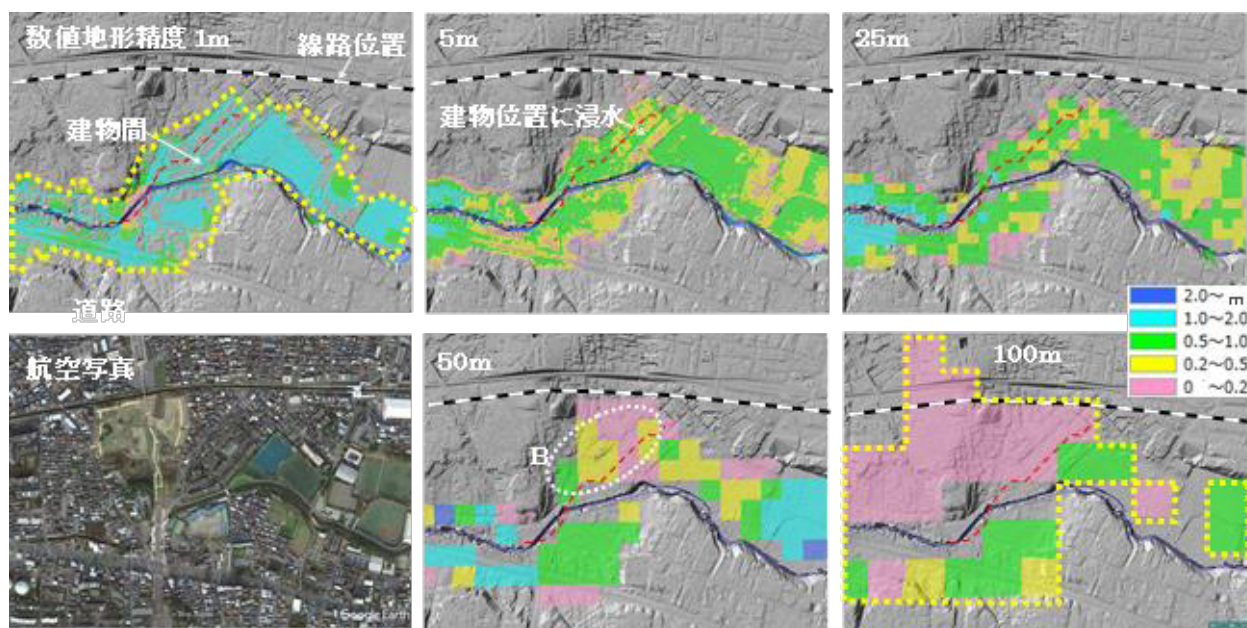


図7 図4におけるC付近の拡大図（航空写真はGoogle Earthより抜粋）

景に表示するDEMの形状と浸水範囲を比較すると、建物が反映された浸水域となっていることが分かる。5mメッシュでは、建物が考慮されていないことからその用地に浸水範囲が広がり、それに応じて最大浸水深は0.5～1.0mと浅くなるのが分かる。しかし、河川を中心とする浸水範囲端部までの広がりやその形状は1mメッシュと大きな差はなく、全体の浸水範囲としてはほぼ一致する結果となった。25mメッシュも5mメッシュの場合と同様であり、解像度は低くなるものの図中の赤破線で例示する土地の高低および形状に矛盾しない浸水範囲が分布している。

一方、50mメッシュでは、図中B部分などの地形と比較して、土地が高いところまで浸水するなど背景のDEMと矛盾する浸水範囲がみられ、また最大浸水深の分布も0.2m以下から2.0m以上のばらつきが顕著になっている。さらに100mメッシュになると、最大浸水深、浸水範囲ともに大きく乖離する結果となった。

参考値ではあるが、図7中の黄破線（数値地形精度1mと100mのみ表示）で示すように浸水範囲の外縁を包絡する部分の面積を比較したところ数値地形精度1mに対して5m、25m、50m、100mではそれぞれ103%、103%、118%、155%となっている。

以上のことから、数値地形精度1mの解析結果を最も現実に近い値と仮定した場合、数値地形精度25m以下であれば浸水範囲はほぼ一致する結果が得られた。一方、最大浸水深をみると、建造物の影響を考慮していないため過少に評価する可能性があることがわかった。

#### 4. 流出・氾濫解析の計算負荷に関する検討

降水量予測値を外力として流出・氾濫解析を行い、氾濫の影響範囲を避けた列車の停止位置を解析する一連のシステム開発<sup>7)</sup>にあたっては、可能な限り解析精度を高めつつ結果のアウトプットまでの時間を短縮する必要がある。そこで、その基礎資料として実測降雨を対象に、数値地形精度をパラメータとして計算に要するリソースについて整理した。

表1は対象とした降雨の一覧を、図8は各降雨の時間系列データをそれぞれ示す（東海豪雨については図3参照）。局地的短時間降雨、台風9号については近年発生した降雨の中から特に大きいものを選定した。表2は、数値地形精度と計算時間との関係をまとめたものである。なお、計算に用いたプラットフォームはIntel(R) Core™ i7-4770 CPU @3.4GHz 3.4GHz, 4 cores/8 Threads, 32.GB RAM 搭載のPCである。

表から、数値地形精度が高いほど、また降雨継続時間が長いほど計算時間が増加することが分かる。表中には目安として計算時間30分以下のものをハッチングしているが、数値地形精度1mの場合はいずれも30分を大きく超えることが分かる。

本研究では、外力として数十分から数時間先の降水量予測値を用いることを想定しているが、それらのデータ通信に要する時間や列車停止位置の解析に要する時間等を考慮してリードタイムを最小化する必要がある。例えば、1時間先までの予測値を取得しても、最終的な計算結果の出力に30分を要した場合、実用的な計算結果は予測値の50%に留まることになる。そのため、現時点

特集：防災技術

では実装に問題ないと考えられる数値地形精度 25m を基準とした運用とし、近年の PC の高性能化を念頭に数値地形精度の高度化に取り組む必要がある。

表 1 検討対象降雨

降雨	降雨発生期間	解析時間 (作用時間+3時間)
局所的短時間降雨	2017年8月19日15:00～ 2017年8月20日1:00	13h
台風9号	2016年8月21日18:00～ 2016年8月23日0:00	48h
東海豪雨	2005年9月4日19:00～ 2005年9月6日19:00	51h

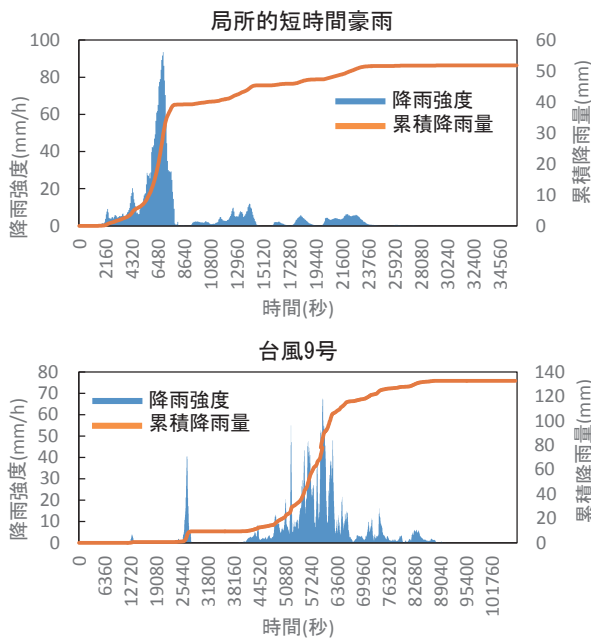


図 8 各降雨の概要

表 2 数値地形精度別の計算時間のまとめ

	解析時間 (h)	累積降雨量 (mm)	地形解析精度 (m)	計算時間 (分)
局所的短時間降雨	13	52	1	305.9
			5	1.9
			25	0.1
台風9号	33	133	1	553.9
			5	9.8
			25	0.3
東海豪雨	51	589	1	2485.5
			5	102.4
			25	1.5

※いずれの降雨でも運転への影響は発生していない。

5. まとめと今後の課題

本報告では、流出・氾濫解析モデルの妥当性について、自治体が整備した浸水予想区域図との比較および数値地形精度 1m から解析精度を大きくした場合の解析結果の比較により、数値地形精度が 25m 以下であれば最大浸水深はやや低めに評価されるものの浸水範囲は概ね一致することを確認した。また、システム化にあたっての検証として降雨規模と計算負荷との関係を取りまとめた。今後の課題として、排水設備を精緻に実装した際の計算リソースへの負荷を把握するとともに、実際の水位計測データとのデータ同化により流出・氾濫解析精度の高度化を図る必要がある。また、仮に湛水した場合でも鉄道の運行等に影響がない高架区間や高盛土区間について、氾濫の影響をどのように評価するのが最適かどうか検証する必要がある。

本報告の内容の一部は、総合科学技術・イノベーション会議の SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)「レジリエントな防災・減災技術の強化」(管理法人: JST)により実施したものである。

文献

- 1) 気象庁：高解像度降水ナウキャスト [http://www.jma.go.jp/jma/kishou/nowcast/highres\\_nowcast.html](http://www.jma.go.jp/jma/kishou/nowcast/highres_nowcast.html)  
(最終閲覧日：2018年3月8日)
- 2) 尾崎尚也, 渡邊拓也, 深澤紀子：突風・浸水予測を用いた列車停止及び避難誘導アルゴリズム, 鉄道総研報告, Vol.31, No.10, pp.5-10, 2017
- 3) 川越健, 尾崎尚也, 太田直之：降雨予測値を活用した「局地強雨対応の鉄道減災システム」, SIP 防災シンポジウム 2017 予稿集, p.23, 2017
- 4) 立川康人, 永谷 言, 寶 馨：飽和・不飽和流れの機構を導入した流量流積関係式の開発, 水工学論文集, pp. 7-12, vol. 48, 2004.
- 5) 水理公式集平成 11 年度版, p. 97, 式 (2-2.21)
- 6) 石神井川及び白子川流域浸水予想区域図：東京都建設局, 平成 15 年 5 月 15 日作成
- 7) 浦越拓野, 川越健, 渡邊論, 尾崎尚也：降水量予測値を用いた豪雨時鉄道減災システム, 鉄道総研報告, Vol.32, No.7, pp.23-28, 2018