都市部での内水氾濫解析と浸水リスク共有化への取り組み

大成建設（株）　正会員　○大野　剛
大成建設（株）　正会員　永野　雄一
大成建設（株）　正会員　飯村　浩太郎
大成建設（株）　正会員　高山　百合子

１．はじめに

近年，地球温暖化の影響により，強大化した台風や線状降水帯などに伴う豪雨災害が激甚化・頻発化している[1)]．線状降水帯は，次々と発生した積乱雲が同じ場所を通過または停滞するため，激しい雨が数時間にわたって降り続く集中豪雨をもたらす．集中豪雨により，河川の氾濫や建物や道路の冠水が発生するほか，降水量が下水道等排水施設の処理能力を上回る，あるいは，降雨の排水先である河川水位が高くなり雨水を排水できなくなったことで地表にあふれ出す内水氾濫が引き起こされる[2)]．また都市部においては，ヒートアイランド現象の影響も加わり，積乱雲が発生しやすく集中豪雨が頻発化している．内水氾濫を防ぐ対策としては，排水処理能力の向上を目的とした下水道整備や，河川管理者による雨水貯留浸透施設の整備，排水ポンプの運転調整などのインフラ対策が進められている．また，下水道を整備することが困難な区域を「浸水被害対策区域」に指定することや，民間施設の地下空間を活用した内水対策として雨水貯留施設の整備を促進する取り組みが進んでいる[1)]．しかしながら，現在でも内水氾濫の浸水被害は多数発生しており，例えば佐賀市においては，令和元年 8 月に 1 時間最大降水量 110mm を記録し，降水量が下水道の処理能力を超えて冠水被害が各所で発生し，市街地のほぼ全域が内水氾濫により浸水した[3)]．気象庁の観測記録によると，1 時間降水量 50mm 以上，3 時間降水量 150mm 以上などの大雨の年間発生回数は有意に増加しており，激甚化・頻発化する浸水害に対処するハード対策とソフト対策を併用して講じることが重要である[4)]．浸水時の避難経路や避難場所等について記載したハザードマップの基となる浸水想定区域図については，平成 27 年の水防法の一部改正以降，想定し得る最大規模の洪水や内水に係る浸水想定区域の公表が進められている[5)]．

建設分野においては，浸水害に対する BCP や既存建物の浸水対策工事の増加を受けて，浸水リスクの評価支援や，施工者自らが計画地の浸水リスクを理解する必要性が高まりつつある．そこで，浸水解析を活用して浸水リスクの評価や共有化を行うための効果的なツール整備を進めている．本稿では，東京都渋谷区の渋谷駅周辺を例に，内水氾濫の評価およびリスク共有化を目的とした浸水解析の事例を紹介する．

２．内水氾濫解析

(1)　解析条件

内水氾濫解析による浸水特性の把握に関するケーススタディを実施した．以下に結果を示す．

内水氾濫解析では，対象エリアの標高や建物配置，下水管路網，下水管路の排水処理能力を考慮して，降雨の地表面流下および下水管路網内への流入を計算し，地表面における雨水の流向や流速，浸水深などを逐次計算で求めた．対象領域の建物分布及び下水管渠分布を**図-1** に，対象領域の諸元を**表-1**，

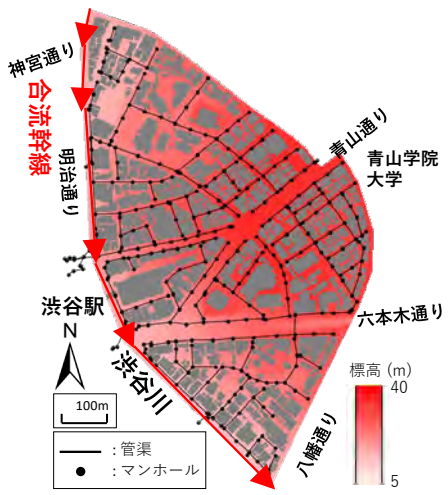


図-1　渋谷駅東口エリア計算対象領域

キーワード　内水氾濫，浸水リスク，浸水想定区域，BCP，3D 可視化，PLATEAU
連絡先　〒245-0051　神奈川県横浜市戸塚区名瀬町３４４－１　　ＴＥＬ　０８０－９５７９－４３５２

入力データの出典を**表-2** に示す．計算領域は，渋谷駅周辺を対象とし，西は渋谷駅から東は青山大学のキャンパスの手前まで，南は八幡通りと明治通りの交差点から北は神宮通りと明治通りの交差点までの領域とした． 標高データと建物配置データは，基盤地図情報[6]を利用したが，その他，国土数値情報[7]や，後述する国土交通省が普及展開を進めている 3D 都市モデル「PLATEAU」[8]が利用できる．下水管路網のデータは，自治体が公開する下水台帳から，配管の位置と直径，埋設深さ，マンホールの位置等を取得した．対象領域は渋谷駅に向かって斜面となっており，降雨は最終的には明治通りの地下に配置されている幹線下水道もしくは渋谷川に排出される．今回の解析範囲では，領域面積が 37.6ha，メッシュサイズが 2m×2m，メッシュ数が 94110，下水管の管渠数が 332 であり，解析負荷が大きくなるため GPU を用いて内水氾濫解析の高速化を行い，計算時間の低減を図っている[9) 10)]．

表-1　解析領域諸元

領域面積(ha)	37.6
メッシュ生成手法	構造格子
メッシュサイズ	2m×2m
メッシュ数	94110
管渠数	332
ノード(人孔，吐口)数	335

表-2　データの出典

建物データ	基盤地図情報(国土交通省)
標高データ	基盤地図情報(国土交通省)
下水道データ	下水道台帳(東京都)

(2)　短時間豪雨による浸水（ケーススタディ１）

急に激しい降雨が生じて短時間で降り終わる局地的大雨（ゲリラ豪雨）を念頭に，計算期間を 7200 秒とし，降雨量を 3600 秒までは 150㎜/h，それ以降は無降雨とした解析を実施した．タイムステップは 0.01 秒とし，境界条件は壁境界（通過流量 0）として，解析領域内側の雨水は下水道管を通じてのみ領域外に排出されるものとした．下水道の排水条件は，1 時間降水量 75mm として設定した．

渋谷駅東口エリアにおける内水氾濫解析結果を**図-2** に示す．降雨が継続する計算開始から 30 分後，60 分後の結果では，浸水域が徐々に拡大していることが分かる．渋谷駅東口エリアは，渋谷駅に向かって傾斜しており，解析領域の東側への降雨が西側へ流れている．そのため，明治通り沿いで浸水深がほかの箇所よりも大きくなっている．また，六本木通り上の東側の箇所で浸水がみられるが，これは首都高が青山トンネルに入る箇所であり，標高データ上は単なる窪みとして表現され雨水が溜まったためである．その後，無降雨が 60 分継続した 120 分後の結果では，下水道による排水によって浸水域は減少しているが，60 分間の無降雨期間後も浸水箇所は多く残されている．これは窪地に溜まった水が下水道に流入することなく，そのまま残されているためである．このように，内水氾濫解析は浸水深の時間的な変化を把握するのに有効であることが分かる．

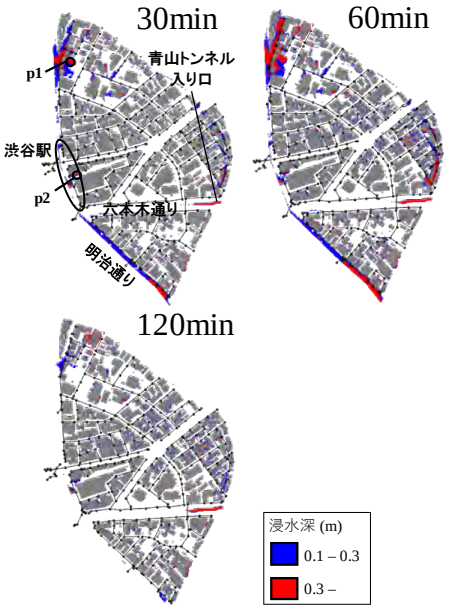
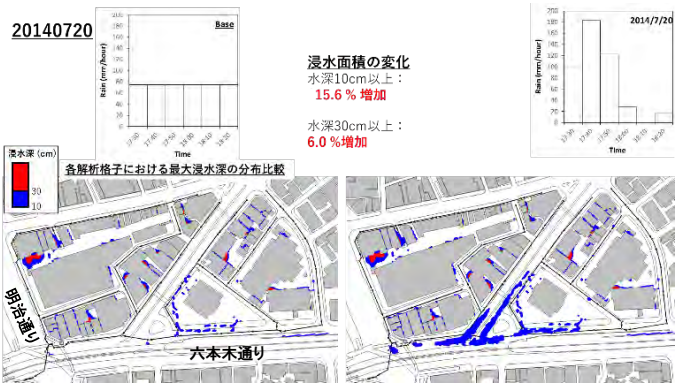


図-2　東口エリアにおける浸水深分布

(3)　降雨パターンの影響（ケーススタディ２）

図-3 は，1 時間降水量 75mm の場合の内水氾濫解析を実施した結果である．**図-3**（a）は，1 時間連続して降水量一定（時間降水量 75mm）の雨が降った場合，**図-3**（b）は，実際の降雨を参考に 10 分ごとに



（a）常に同じ降水量　　（b）10 分ごとに変化

図-3　降雨パターンによる浸水範囲の違い

変化する降水量を設定し，降水量が 0 から 180mm の間で変化するが，1 時間平均では前者と同じ 75mm となる場合の結果である．解析結果を見ると，**図-3（a）**に比べて**図-3（b）**は，浸水深が 10cm 以上となる面積が 15.6%，浸水深が 30cm 以上となる面積が 6.0%それぞれ増加している．これは，短時間で大量の降雨が発生した場合，排水が追い付かず，内水氾濫の面積が増加することを示している．このように，同じ降水量であっても降雨のパターンにより浸水規模が変化することが浸水解析により分かる．

３．PLATEAU を用いた浸水状況の可視化

(1)　浸水リスクの共有化

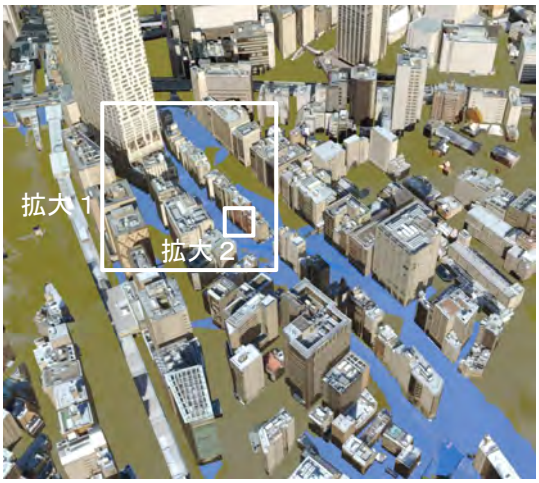
浸水リスクを地域住民に周知し，住民が安心安全に避難できるようにするために，自治体は水害ハザードマップを作成，整備している．一般に水害ハザードマップでは，浸水範囲や最大の浸水深などの面的な情報を地図面に掲載している．ただし，浸水範囲や各地点の浸水深最大値を表示しており，これらは同時に生じているとは限らない．そのため，時々刻々の浸水状況の変化や 3 次元的なイメージを，閲覧した地域住民が把握することは困難である．また，前述したような浸水解析は，浸水リスク評価や把握において重要な役割を果たすが，その解析結果を理解するには，ある程度の専門性が必要となる．

市民や建物所有者などの間で，円滑な合意形成を図るには，発生し得る浸水リスクを分かりやすく伝え，共有化する必要がある．また，降雨規模を変化させたケースの比較等を 3D マップなどにより比較出来れば，浸水被害の特性が効率的に共有化でき，浸水リスクを具体的にイメージすることに繋がる．これに対し一部の自治体では，浸水深や浸水範囲を 3 次元のアニメーションで表示する取組みをしている．ただし，3 次元アニメーションを作成するには，都市の 3D データの準備や CG の専門技術が必要であり，時間やコストを要する．これに対し国土交通省では，3D 都市データ「PLATEAU」[8] を一般公開し，防災等への活用を推進している．ここでは，3D 都市モデル PLATEAU を利用した，浸水解析結果の 3 次元可視化表示について紹介する．

(2)　3D 都市モデルと浸水解析結果の重ね合わせ

図-4 は，内水氾濫の解析結果を PLATEAU の 3D 都市モデルデータと重ね合わせた結果である．なお浸水深は，3D 表示の視覚的効果を確認するために試行的に設定したものであり，浸水深を時間的に変化させアニメーションを作成した．

重ね合わせは， 3DCG 等を製作できるフリーソフトウェア「Blender[11]」を用いて行った．重ね合わせの手順は，まず PLATEAU から該当範囲の建物群データ（FBX ファイル形式）をダウンロードして読み込む．次に，テキストデータで出力される緯度・経度と浸水深の解析結果を水面データに変換し，水面と建物群データと重ね合わせる．なお，解析結果を「Blender」で読み込み可能な水面データに変換するコードは，独自に構築した．その後，浸水状況を把握したい画角を設定し，「Blender」の機能を活用して建物群や水面の鮮明度（照度），水面の半透明化などを調整し，浸水状況を視認しやすくする．



（a）解析結果との重ね合せ



（b）拡大例（拡大１）



（c）浸水深の確認（拡大２）

図-4　３次元表示例

最後に，解析時間ごとに都市データと水面を重ね合わせた図を自動で作成するコード（独自に構築）を利用して図を連続的に出力し，これらを繋ぎ合わせてアニメーションを生成した．

図-4 は，ある時間のスナップショットを示したものである．ここでは，異なった視点と拡大率で表示したものを例示した．**図-4**（a）は，広い範囲を俯瞰して確認した場合であり，浸水範囲がどの程度拡がっているかを視認することができる．**図-4**（b），（c）は，特定の地点について拡大した例である．**図-4**（b）では，注目する建物周辺の浸水状況を確認できることがわかる．また**図-4**（c）では，建物や窓・扉の高さと浸水深の関係を視覚的に比較できるため，実際にどの程度の浸水深であるかを直感的に確認できる．

以上のように，BCP 計画における浸水対策の効果を直感的に確認することが可能になるなど，関係者間の合意形成において，本技術が効果的であることが分かる．また，建設工事への適用として，例えば建物周辺や街区などに対して大規模な止水壁や盛土などの浸水対策工事を行う場合，浸水対策工事を実施した場合の内水氾濫解析を行い，解析結果を 3 次元表示することで，関係者間での対策効果の共有が容易となり，円滑な合意形成に寄与することが期待できる．

(3) 技術的な課題

上述の，3D 都市モデルと浸水解析結果の重ね合わせにおいては，以下のようないくつかの課題がある．

3D 都市モデルに対し解析結果の水面表示を重ね合わせるため，解析の入力条件となる建物形状や地形が，3D 都市モデルと整合している必要がある．例えば，解析モデルと 3D 都市モデルの座標に微妙なずれがあると，水面が建物内に入り込む，あるいは水面に穴が空いたような状態の表示になる．これについては，解析用の入力ファイル自体を 3D 都市モデルから作成することで，両データの矛盾を防ぐことが可能となる．

直感的な視覚効果を高めるためには，より現実的な水面の表現が求められる．専門的な CG 技術を用いれば可能であるが，汎用的なツールとして活用するためには，簡易な方法が求められる．水面の色使いや透明度の設定，あるいは全体表示における光源の設定によって，ある程度リアルな表現が可能になると考えられるため，水面の設定手法について検討を進めている．

4．おわりに

豪雨災害が激甚化・頻発化している昨今では，浸水解析技術は重要なツールとなっている．浸水解析では，標高や建物情報，下水管路網情報を反映した浸水解析結果が得られ，浸水深や浸水範囲を時系列で求めることができる．ケーススタディ等の結果を関係者間で共有することは，浸水リスク評価や浸水対策の効果検証，BCP 対策の具現化において重要となり，ここで示した 3 次元可視化技術は，これを支援する有用なツールとして活用できる．今後も，浸水解析を活用したリスク共有方法を検討し，浸水から人や街を守る取り組みに繋げていく予定である．

参考文献

1) 国土交通省：総力戦で挑む防災・減災プロジェクト，https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/sosei_point_tk_000034.html，参照 2023.07.
2) 川崎市：防災ポータルサイト，https://portal.kikikanri.city.kawasaki.jp/，参照 2023.07.
3) 佐賀県：防災・減災さが，https://www.pref.saga.lg.jp/bousai/kiji00370893/index.html，参照，2023.08.
4) 気象庁：大雨や猛暑日など（極端現象）のこれまでの変化，https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html,，参照 2023.07.
5) 国土交通省：水防法，https://www.mlit.go.jp/river/suibou/suibouhou.html，参照 2023.07.
6) 国土交通省国土地理院：基盤地図情報，https://www.gsi.go.jp/kiban/，参照 2023.07.
7) 国土交通省：数値地図情報，https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/，参照 2023.07.
8) 国土交通省：PLATEAU by MELT，https://www.mlit.go.jp/plateau/，参照 2023.07.
9) 永野雄一，高山百合子，織田幸伸：GPU による都市浸水解析の高速化検討，大成建設技術センター報 第 54 号，43，2021.
10) 永野雄一，高山百合子，織田幸伸：渋谷駅東口エリアを対象とした GPU による浸水解析高速化の検証，土木学会第 77 回年次学術講演会講演概要集，II-107，2022.
11) blender：https://www.blender.org/，参照 2023.07.