

浸水リスク予測技術と 事業継続にむけた浸水対策支援 Inundation Risk Assessments and Risk Management Supports for BCP

榎木 康太 萩原 由訓 副島 紀代 辻 武 (北陸支店) 浜地 克也 (土木本部)	Kota Enoki Yoshinori Hagiwara Michiyo Soejima Takeshi Tsuji Katsuya Hamachi
---	---

1. はじめに

世界の中でも多雨地域にある日本では、毎年降雨に伴う水害が発生し、甚大な被害は後を絶たない。記憶に新しいところでは、2019年の房総半島台風(台風15号)、東日本台風(台風19号)による暴風雨で、河川氾濫、土砂災害が東日本を中心に広範囲に渡って発生した。Table 1には2020年以降の国内の主な水災害の一覧を示す¹⁾等。特に、水災害は気候変動の影響がいち早く顕在化し潜在的な危機が高まりつつある災害種と考えられており²⁾、将来にわたって安全・安心な社会を構築する上で、被害低減に向けた備えが急務である。その1つの方策として、多くの企業において、浸水被害リスクへの対処を念頭とした事業継続計画(BCP)の策定が進んでいる。ここでは、その策定に資する最新の浸水リスク予測技術とともに、水害対応BCP策定支援の事例を紹介する。具体的には、まず、浸水リスクの有無の判断に有効な簡易リスク評価手法について述べる。次に、浸水リスクの把握に有効な数値解析手法を紹介する。そして、事業主のBCP策定サポートのための具体的な取り組みとその検討過程を通じたメリットについて解説する。

2. 浸水リスク評価技術の紹介

2.1 GISによる簡易リスク予測

浸水対策の検討に際し、まずは浸水リスクの有無の判定が必要となる。公的機関による河川洪水・内水氾濫・高潮・津波のハザードマップの作製・配布が義務化されて以来、2100を超える河川で洪水浸水想定区域の指定が済んでいる。また、これらの河川では流域治水事業の一環で「水害リスクマップ」(多段階の浸水想定によるリスク情報)も整備されつつある。さらに2021年の水防法改正で、全国の1級・2級河川約22000のうち、円滑・迅速な避難確保等を図る必要のある15000河川が整備対象に追加され2025年度までの整備完了が予定されている。今後益々、利用しやすくなる一方、未整備地域も依然存在し、その場合には周囲の地形情報によるリスク把握技術が有効となる。以下では、大林組の地理情報システム(GIS)を活用したリスク判定手法を紹介する。

2.1.1 GISによる浸水リスク有無の判定 大林組では、既存構造物や建設予定地点における浸水リスク有無の判定においてハザードマップ、微地形区分や浸水被害

Table 1 2020年以降の国内の主な水災害¹⁾等
Disasters Relevant to Water since 2020 in Japan

時期	地方	災害	要因	主な被害
2020.7	西日本や東日本	河川氾濫 土砂災害	停滞前線	球磨川・筑後川・飛騨川・最上川氾濫
2021.7	東海・関東南部	土砂災害	大雨(大気不安定)	熱海市で土石流
2021.8	西日本～東日本	河川氾濫 土砂災害	前線活発化	佐賀県六角川氾濫
2022.1	太平洋沿岸	気象津波	海底火山噴火	潮位変化最大1m超
2022.8	東北・北陸	河川氾濫 土砂災害	前線・線状降水帯	各地で土砂災害発生
2022.9	東日本太平洋側	河川氾濫 土砂災害	台風15号	静岡県巴川等で氾濫
2023.6	西日本～東日本の太平洋側	河川氾濫 土砂災害	梅雨前線・線状降水帯(台風2号)	静岡県内土砂崩れ等による道路通行止め
2023.6-7	北海道・東北・山陰・九州北部	河川氾濫 土砂災害	梅雨前線・線状降水帯	床上・床下浸水
2023.9	関東甲信・東北太平洋側	河川氾濫 土砂災害	線状降水帯(台風13号)	千葉・茨城・福島で床上・床下浸水
2024.1	能登半島・新潟	津波	地震	珠洲市で浸水深4m

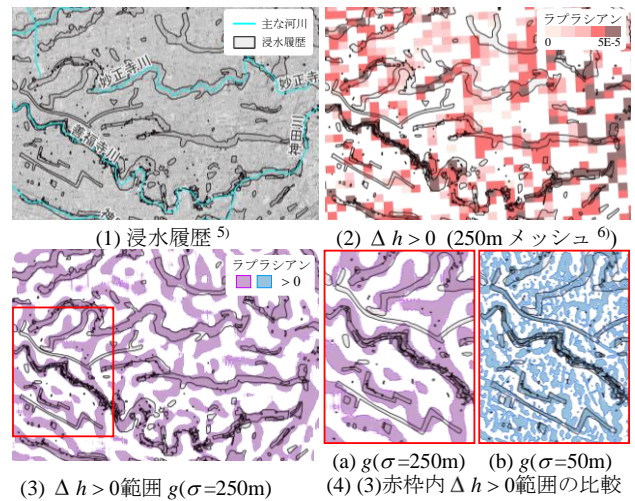


Fig. 1 国土調査実績浸水域と窪み部抽出結果の比較
Observed Inundation (1) and Depression Areas Extracted by the Conventional Method (2) and the Proposed Manner (3), (4).

履歴等の一般的な情報に加え、全国で利用可能な数値標高データを活用しリスクの見逃し防止に役立てている³⁾。

本報では、谷や窪地状の集水地形の判別が可能なラプラシアンと呼ばれる地形の凹凸度指標を水害分野に応用した事例を示す。一般的なデジタル標高データは格子状に配置された点 $\mathbf{x} = (x_i, y_j)$ (i, j は格子点番号) に標高値 $h(\mathbf{x})$ を持つ。そのラプラシアンは次式で算出される。

$$\Delta h(\mathbf{x}) = \partial^2 h(\mathbf{x}) / \partial x^2 + \partial^2 h(\mathbf{x}) / \partial y^2 \quad (1)$$

ここで水平解像度 ($\Delta x, \Delta y$) は便宜的に標高データの格子間隔が採用される。一方、次式の空間平均幅 σ を持つガウシアンフィルタ g を高解像度の標高データに適用後、式 (1) を適用することで、粗視化された地形の凹凸が抽出できる (LOG, Laplacian of Gaussian フィルタ)⁴⁾。

$$\bar{h}(\mathbf{x}) = \int_{\mathbf{x}'} g(\mathbf{x}' - \mathbf{x}, \sigma) h(\mathbf{x}') d\mathbf{x}', \quad g(\mathbf{r}, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\mathbf{r}^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

以上の抽出手法の適用例を Fig. 1 に示す。(1) は東京都西北部の過去の浸水履歴範囲⁸⁾であり、(2) は 250m メッシュ標高⁹⁾に式(1)を適用した従来手法による窪み範囲を示し、(3) は 5m メッシュ標高⁷⁾から $\sigma=250\text{m}$ の LOG フィルタで抽出した窪み範囲である。同一の代表空間スケール 250m の Fig. 1 (2) と (3) を比較すると、(3) の分布は連続的で浸水範囲との対応がよい。次に、(3) の赤枠範囲で空間平均幅 σ を変化させたときの比較を(4)に示す。(a) σ 250m に比べ (b) σ 50m では、浸水履歴範囲との整合性が向上している。浸水現象は局所的なものから広域に及ぶものまで多岐にわたるが、空間平均幅 σ を考慮することで様々な規模のリスク箇所の抽出が可能となる。

Fig. 2 に本手法でリスク範囲を抽出した事例を示す。(1), (2) とともに大臣管理区間外の河川氾濫事例で災害発生時、公的な浸水想定は設定されていない。両図 (a) の赤い範囲の浸水域は、両図 (b) の窪み抽出範囲とほぼ整合している。また、(2) では空間平均幅 σ 500m の方が σ 250m よりも浸水域との対応がよい。(2) は大河川の広大な氾濫原で発生し、よりスケールの大きな窪みにまで氾濫が及んだためと考えられる。以上のように、全国で利用可能となりつつある高解像度の標高データに、災害の現象スケールを考慮したフィルタを施す本手法は、浸水想定がない状況でリスクの見逃し防止に有効である。

2.1.2 定量的な浸水確率評価 内水氾濫を対象としたハザードマップの整備率は主要な水害の中でも低い¹⁰⁾

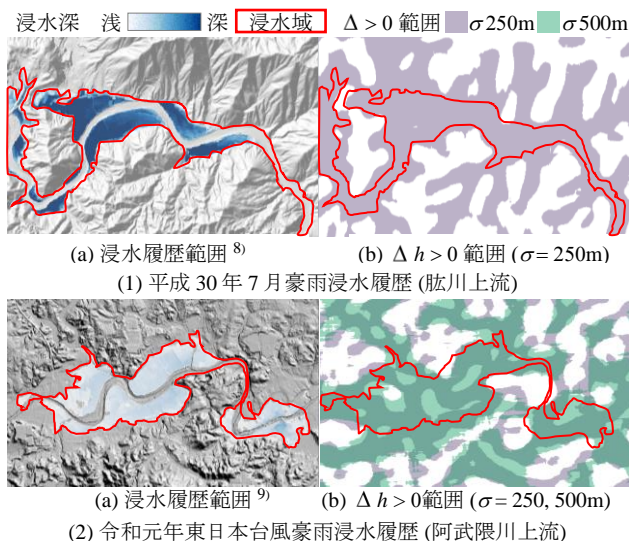


Fig. 2 河川氾濫浸水域と提案手法による窪地抽出結果
 Examples of Inundation Observed in Recent Disasters and Depression Area Extracted by Proposed Manners.

が、被災頻度は高いため、任意地点における簡便かつ定量的な評価が望まれる。大林組では、東京都の被害履歴とラプラシアン、平均 S 波速度等の局所的な地形因子情報とのロジスティック回帰分析を行い、浸水の有無を確率的に予測する式を構築した¹¹⁾。回帰モデルの検証の結果、東京における予測的中率は約 77%であった。さらに構築した予測式を異なる地域にも適用・検証し、同程度以上の予測精度となることも確認された (Fig. 3 は横浜に適用した事例)。作成した浸水確率予測式は東京都以外の地域に適用することも可能であり、全国どこでも統一した基準で浸水危険度を評価することができる。

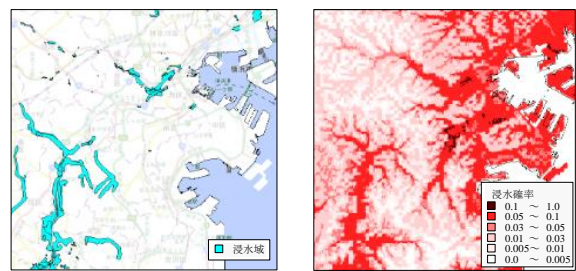
2.2 浸水シミュレーションによる予測

大林組では、流体の基礎方程式に基づき水の挙動を予測する解析技術を任意地点の浸水状況の経時変化の把握や対策の立案に活用している¹²⁾。ここでは新たに開発した広域の浸水予測に有用な 2 次元解析について紹介する。

2.2.1 解析手法 基礎方程式系は質量保存則と運動量保存則からなる平面 2 次元の浅水方程式である。ソース公開型の有限体積法ライブラリ OpenFOAM¹³⁾を利用したプログラムである。特長として、非構造格子の採用により建物等の障害物の平面形状の再現性が高く、必要箇所に格子を集中させ、地形の細かな凹凸を再現した浸水解析を、並列計算により高速で実行できる点がある。

2.2.2 解析手法の検証 梶川¹⁴⁾の解析に倣いソルバの検証を行った。Fig. 4 にその概要を示す。対象となる実験は (1) のダムブレイク問題で紙面奥行 y 方向を一樣とし、水は x 方向に運動する。初期時刻 $t = 0$ 秒に壁 AB を除去した後の水の挙動 (z 方向水位, x 方向流束) を解析する。(2) の 3, 15, 30 秒後の水面形状は梶川¹⁴⁾の結果とよく整合する。15 秒後、下流側の盛土を越流・一部 ($x = 17\text{m}$ 付近) は反射し、30 秒後には原点の壁でさらに反射した波が $x = 9\text{m}$ 付近に再現されている。(3) の計測点における実験と解析結果はよく一致しており、本解析手法による水深の予測精度が高いことが確認された。

2.2.3 実地形上の浸水解析 ある河川の河口付近の右岸を対象領域とし、氾濫解析を適用した事例を Fig. 5 に示す。(1) は標高分布と地形区分である。道路や小河川の凹凸の再現性に配慮し、5m メッシュ標高⁷⁾を用い、



(1) 国土調査浸水域 (2) 予測式による確率評価結果

Fig. 3 国土調査による実績浸水域と確率予測の比較¹¹⁾
 Past Inundation Area and Predicted Probability of Inundation.

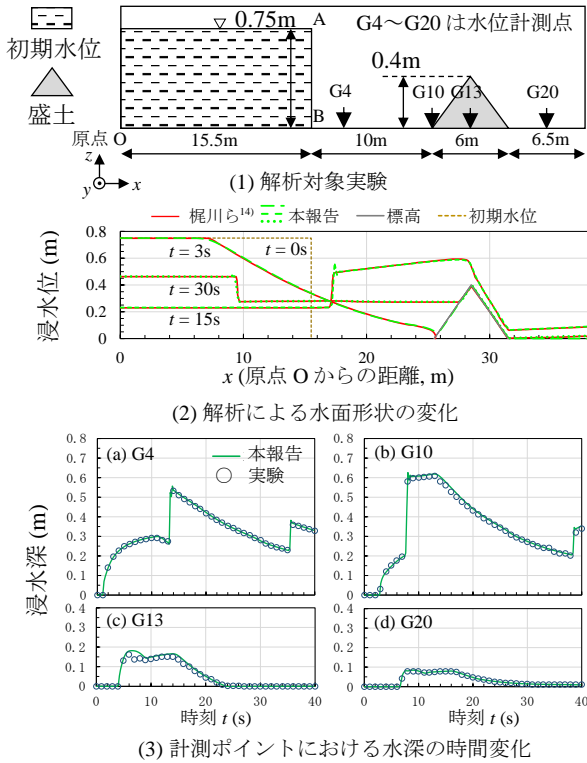


Fig. 4 検証計算の概要と解析結果の比較

Calculation Model for Verification and Comparison of Results

解析セルを 5m とした。赤印の箇所で護岸が破堤した想定で、国交省の浸水解析¹⁵⁾を参考に最大 70m³/s の流量を与え浸水初期段階の浸水過程を解析した。破堤後 3 時間の水深分布を (2) に示す。自然堤防や海岸段丘の微高地を避け低地に水が広がる様子が分かる。浸水リスクの高い場所で本手法を適用することにより浸水過程の理解や効果的な対策の検討に有効となる。

3. 浸水対策事例の紹介

企業の危機管理に対する意識は高く、災害時の事業活動の停止による損害を最小限に抑えるための BCP 策定を念頭においた新規の建築計画や改修に関する要望は多い。一方、災害の多い日本において、あらゆる種類・規模の災害に対し防護施設等のハード対策を主とする方法で被害を防ぐには、莫大な費用と時間を要する場合がある。重要施設を除き、一般的な事業所では個別の状況に応じて現実的な想定を設定し、対策を立案する必要がある¹⁶⁾。

BCP 立案と遂行は、企業の経営戦略の一つとしてとらえられており、事業者の事業内容や事業規模、収益形態によって自身が策定する。その原則の下、大林組は、災害に強い建築物、設備等の施設インフラの提供を通じて、顧客の事業を支える取り組みを実施している。

3.1 水害対応 BCP の策定サポート

ここでは、水害に対する事業継続計画の策定を例に大林組の支援の取り組みと事業者のメリットを紹介する。



Fig. 5 ある河川の河口付近における 2 次元浸水解析の例

Flood Simulation around a River Estuary

Fig. 6 は、浸水対策 BCP の策定支援のために組成される典型的な組織体制を示す。大林組は、BCP 策定専門家を携え、事業者の経営層 (BCP 策定リーダー) と BCP 策定のプロセスをサポートする。また、BCP 策定の前提条件となる災害リスク情報の整理・評価は自然災害の専門家により実施され、信頼性の高い情報が事業主に提供される。これは、避難計画等のソフト対策だけでなく、ハードによる浸水対策を検討する段階でもその設計クライテリアとなるため、信頼あるリスク評価結果とそれに対する事業主とのコンセンサスが重要である。

Fig. 7 に、BCP 策定サポートの流れと期待される取り組みの効果を示す。まず、BCP 策定業務を進める組織体制を構築し、事業者の経営層から水害リスクや対策に対する基本的な考え方 (目的、目標。例えば、「被災後 72 時間以内の重要顧客への製品供給再開」等) や懸念事項のヒアリングを行う。そして、策定対象拠点を対象としたワークショップの開催等により、水害による被害想定、事前対策、避難行動を具体化する。災害発生時のタイムライン作成、サプライチェーンや生産ラインの再構築等の踏み込んだ対策の検討等も実践的な対策として有効となる。災害時行動計画の実践・修正・改善により実効性の向上や、関係者間の連携強化、事業継続を意識した従業員の気付きや工夫を促すといった効果も期待される。

この取り組みを通じ、水害リスクに対する理解が進み、水害対策 BCP の基本方針が明確化する。同時に、重要拠点や重要設備に求められる保護レベルが具体化する。ハード的な防護対策が有効と判断された場合、フェーズ 2 の「ハード対策の検討」へ移行する。

3.2 ハード対策の検討

事業者の水害対策 BCP の基本方針に従い、大林組は、各所の浸水防止性能、構造安定性、設備機能保護等を検討し、現実的に実現可能な対策案の提案を行う。費用面や工期の面から、基本方針の変更にも及ぶこともしばしばある。具体例を挙げると、「近隣河川の国の想定最大規

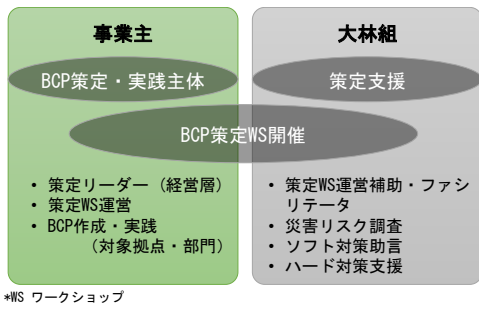


Fig. 6 典型的なBCP策定支援体制
Typical Framework for BCP Development

模の洪水に対して、「敷地全体の浸水防止のために全体を防水壁で囲って防護する」という当初の基本方針から、コスト面を考慮し「防水壁の高さを近隣河川の国の整備計画規模の高さまで低減させ、想定最大規模の洪水には敷地内浸水を許容するも、重要設備については防水区画を設けて、被害を最小限に抑える」方針に変更する等のケースがある。敷地周囲の防水壁と防水ゲートによる敷地防護は景観上の問題があるものの有効なハード対策手段の一つである。大林組は Fig. 8 に示す景観配慮型の防水壁等、事業主の要望や多様な状況に合わせた効果的な対策の提案が可能である。

4. まとめ

本報告では、近年発生した水害を整理するとともに、大林組の浸水リスク評価手法の技術開発と事業主のBCP策定サポートのための具体的な支援内容を紹介した。

大林組では、気候変動による社会経済活動への直接・間接的な影響が懸念される中、水害に強い社会の構築に向けた研究開発への取り組みを継続し、顧客の事業継続を建設業の立場から引き続き支援していく所存である。

参考文献

- 1) 気象庁：災害をもたらした気象事例, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/>, (参照 2024-05-24)
- 2) 文科省, 気象庁：日本の気候変動 2020, 2020
- 3) 萩原, 野畑：GIS データを用いた都市水害に関する簡易危険度評価の研究, 大林組技術研究所報, No. 79, 2015
- 4) 岩橋, 神谷, 山岸：LiDAR DEM を用いた表層崩壊のアクセスメントに適する勾配と凹凸度の計算範囲の推定, 地形, 日本地形学連合, Vol. 30, No. 1, pp.15-27, 2009
- 5) 国交省：平成 22 年度土地分類基本調査 (土地履歴調査)ー災害履歴図 (水害) 東京西北部, 2011

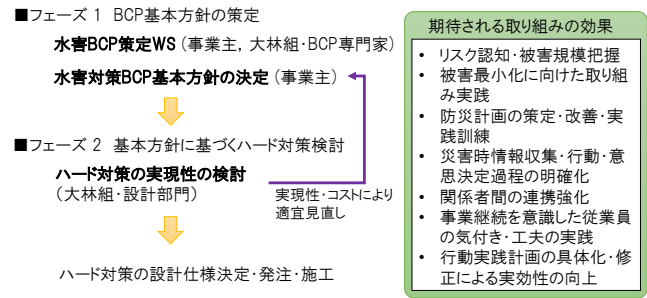


Fig. 7 BCP策定サポートの流れと取り組みの効果
Flow of Support for Developing BCP with Flood Risks and Expected Benefits



(1) アクリルパネル (2) ライトアップ
Fig. 8 景観配慮型の防水壁
Examples of Landscape Friendly Flood Wall

- 6) 国交省：国土数値情報 (標高・傾斜度 5 次メッシュ), <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-G04-d.html>, (参照 2024-05-24)
- 7) 国土地理院：基盤地図情報数値標高モデル 5m, <http://www.gsi.go.jp/kiban/index.html>, (参照 2024-05-24)
- 8) 国土地理院：平成 30 年 7 月豪雨による浸水推定段彩図 (肱川), 技術資料, D1-No. 922, 2018
- 9) 国土地理院：令和元年東日本台風に伴う大雨による浸水推定段彩図, 技術資料, D1-No. 1011, 2019
- 10) 内閣府：令和 4 年版 防災白書, 2022
- 11) 萩原：浸水危険度簡易評価法の研究, 地域安全学会論文集, No. 42, 2023
- 12) 榎木, 野畑：地下空間への浸水シミュレーション技術の適用とその検証, 大林組技術研究所報, No. 84, 2020
- 13) H. G. Weller, et. al. : A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques, Computers in physics, Vol. 12, No. 6, 1998
- 14) 梶川, 檜谷：複雑な地形起伏を有する場における WE NO 法を用いた平面 2 次元流れの数値計算, 第 65 回土木学会中国支部研究発表会, 2013
- 15) 国交省：浸水ナビ, <https://suiboumap.gsi.go.jp/>, (参照 2024-05-24)
- 16) 国交省, 経産省：建築物における電気設備の浸水対策ガイドライン, 2020