

浸水リスク評価・診断システム「T-Flood[®] Analyzer」による 建物地下の浸水解析

大野 剛*¹・山根 正彦*²・永野 雄一*¹・高山 百合子*¹・織田 幸伸*¹・伊藤 一教*¹

Keywords : building basement, flood analyzing, BIM, visualization of three dimensions, business continuity planning
建物地下, 浸水解析, BIM, 3次元可視化, 事業継続計画

1. はじめに

地球温暖化により集中豪雨の増加や台風の強大化、海面上昇に伴う高潮被害の増加などにより山間部、都市部問わず水害が激甚化している。2011年以降、前線や台風が要因となった豪雨災害のうち死者が発生した災害は10件以上発生している¹⁾。近年の豪雨に伴う浸水被害の増加を受けて、国土交通省は2015年に「水防法」を改定した²⁾³⁾。改定では想定し得る最大規模の河川堤防の決壊や越流により河川水が陸域に流入する「外水氾濫」、雨水や下水の処理量を上回る降雨により浸水する「内水氾濫」、沿岸部において台風や低気圧による風の吹き寄せや海面の吸い上げにより海面が上昇する「高潮」のそれぞれについて発生しうる想定最大規模の浸水想定区域図を公開し、避難体制などの充実や強化に役立てるように啓蒙を行っている。また建設予定や建設中も含めた地下街の名称・所在地を地域防災計画に記載することや自衛水防組織を設置することを義務づけるなど、地下浸水被害の低減に向けた取り組みを強化している。

地下階を有する建物が浸水する場合、建物内に流入した水は建物地上階の扉や開口部を介して地上階の廊下や各室に流入し、階段やエスカレーター、エレベータシャフト、吹き抜けなどから地下階へ流入するが、換気や通気を目的に設置した地上部のガラリや、配線・配管を屋内から屋外へ通すために設けた壁部の孔のわずかな隙間からダクトや配管に水が流入し、建物内が浸水することもある(図-1)。また採光を目的に設

けられてた小段に水が流入し、水圧により破損した窓や窓の隙間などから建物内に水が流入することもある(図-2)。重要書類が地下階に保管されている場合や、重量や配線の関係で上層階への設置が難しい機械や電気設備が地下階に設けられている場合が多く、浸水による資機材の流出や設備の機能不全が発生し、建物全体に影響を及ぼす場合がある。また、浸水したエリアには汚泥や汚泥の匂いが残り、除去に時間と手間、コ



図-1 水が流入する地上部のガラリ
Fig.1 Ventilation hole of the ground where water flows in



図-2 水が流入する採光用の窓の隙間
Fig.2 Gap of the window for the lighting where water flows

*1 技術センター 社会基盤技術研究部 水理研究室

*2 設計本部 設計品質技術部 BIM推進室

ストを要する場合もある。

浸水が懸念されるエリア内にある建物では、浸水被害を最小限にとどめ早期に事業を復旧するために、浸水に対する事業継続計画（BCP）の立案が重要となる。

当社では、建物地下の各フロアや各部屋に浸水する経路や浸水深の時間変化を事前に把握して止水や避難への対策を提案する浸水リスク評価・診断システム「T-Flood[®] Analyzer」（以下、本システムとする）を開発し複数の案件に適用してきた。本システムは建物内部の部屋の面積、部屋間の接続状況、各部屋の高さの他、他階への接続方法、ダクトや配管などの配置などを入力条件として浸水解析を実施することにより、浸水経路や浸水深を把握することができ、解析結果は可視化により確認できる（図-3）。本システムは BIM（Building Information Modeling）と連動しており、浸水解析の入力データを自動で作成できるため、入力データの作成に要する手間と時間が低減することができる。また CAD（Computer-Aided Design）や紙面の情報を有している場合は、専用のツールを用いて可視化できる。本稿では本システムの概要と本システムを用いてダクトを有する建物の解析事例を紹介する。

2. T-Flood[®] Analyzer の特徴と概要

2.1 特徴

本システムは以下の特徴を有しており、浸水リスクを把握・評価して、事業継続計画（BCP）などのリスクマネジメントに活用できるものである。

- ① 地上部から建物内の各フロア・各部屋への浸水経路や浸水深の時間変化などを水理公式に基づき計算する。またガラリ、扉底部、ダクトや配管などからの水の流入も計算できる（図-4）。
- ② 解析結果は任意の視点から 3 次元で可視化できる（図-3）ため、関係者間で浸水状況や浸水リスク情報の共有を容易にでき、合意形成ツールとして活用できる。
- ③ また浸水対策に用いる止水板や排水ポンプの配置や数量、嵩上げなどを設置・変更できる。そのため、複数の浸水対策案の比較や、水の流入量が多い箇所に止水対策を講じた場合の浸水状況の把握、止水対策を講じなかった場合における浸水状況の把握などが可能であり、最適な浸水リスク対策案や事業継続計画（BCP）の策定を支援するツールとして活用できる。
- ④ 本システムは BIM と連動しており、BIM データを

有する建物では浸水解析の入力データを自動で作成できる。また BIM 以外の情報、たとえば CAD や紙図面などしか有していない場合は、フロアごとの部屋や扉・止水板などの位置や種類などを専用のツールで作成することで浸水解析の入力データを自動で作成でき、解析結果は単純な 3 次元図や平面図で確認できる。

2.2 実施手順

本システムによる浸水解析および浸水解析結果の可視化は図-5 の手順に従い実施する。

2.2.1 流出・流入条件の整理とネットワーク図の作成

まず、各フロア毎（地下 1 階、地下 2 階など）に壁や間仕切り、床の高さに応じた「エリア」に分けて水の流出・流入の状況を整理する。例えば図-6（a）は建

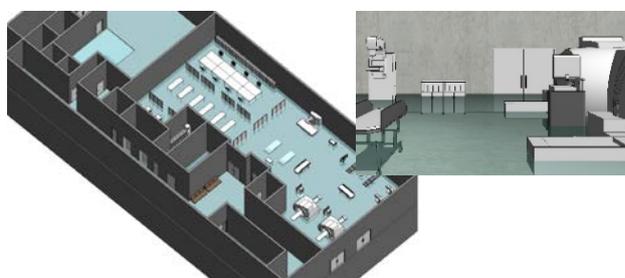


図-3 可視化事例

Fig.3 Visualization example

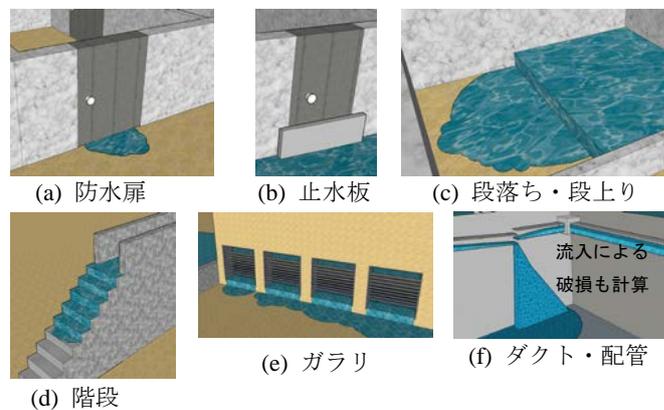


図-4 解析で設定できる条件

Fig.4 Conditions that can be set in analysis

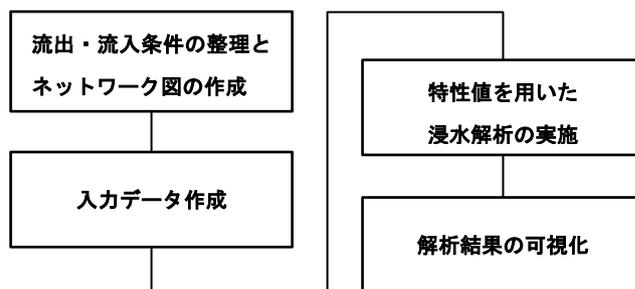


図-5 実施手順

Fig.5 Procedure of the system

物内の間取りを示しており、外部から扉1を介して流入した水は廊下や扉2、扉3、扉4を介して部屋A、部屋B、部屋Cに到達する。ここで解析では壁や扉などで仕切られた空間の他に、部屋Bや廊下のように間仕切りが無くてもフロアの高さが異なる場合は高さごとに分類した「エリア」を定義する(図-6(b))。図-6(c)はエリア間のつながりをネットワークにしたネットワーク図であり、水の流入経路やエリア間の接続条件(扉、段差など)を把握できる。ネットワーク図はどの流入経路を絶てば止水対策に効果的であるかなどを選定する場合に活用できる。

2.2.2 入力データの作成

浸水解析では、各エリアの面積とフロア高さ、および各エリア間の接続の種類と幅を用いる。例えば図-6の場合、エリアの面積とフロア高さからの高低差をエリア1~エリア7で整理し、エリア間を接続する扉の幅と底部の隙間、段差の幅と高さ、止水板の高さと幅などを浸水解析の入力データのフォーマットにまとめる。BIMを用いて図面を作成した場合は、入力データのフォーマットに従ったデータが自動で作成される。

2.2.3 特性値を用いた浸水解析の実施

本システムは図-7のフローに従い浸水解析を行う。解析では、屋外における浸水深の時系列変化を決定し、設定した時間ステップ(Δt)ごとに屋外から建物エリアおよびエリア間の水位差 Δh からエリア間の水の流出量 q を求め、浸水深の増減をエリアの面積を用いて算出する。流出入量の計算は水理公式に従っており、例えば図-8に示すように、高さが高いエリアから低い

エリアに水が流入(段落ち)する場合、エリアの水位差に応じて流入量を求める。また扉を介して水が流入する場合は扉の幅と底面の隙間の高さを用いて流入量を求めている。本システムを開発する以前は、手作業で入力データを作成していたため、入力データの作成に多大な時間と手間を要していたが、本システムは入力データを自動で作成できるため、入力データの作成時間や作成手間が低減する。その他の入力データとして、地上部の浸水深の時系列変化、排水ポンプの配置(設置するエリアと排水能力の設定)がある。なお、解析結果の再現性については、戸田ら⁴⁾実施した地下空間浸水実験の結果と本手法による解析結果を比較したところ、各エリアの最大浸水深や時間変化を精度良く再現していることを確認している。なお、本システムによる浸水解析は一般に普及しているPCで対応可能であり、建物規模にもよるが解析時間は1ケースにつき数分から数十分程度である。

2.2.4 解析結果の可視化

各エリアにおける浸水深の時間変化を把握しやすく

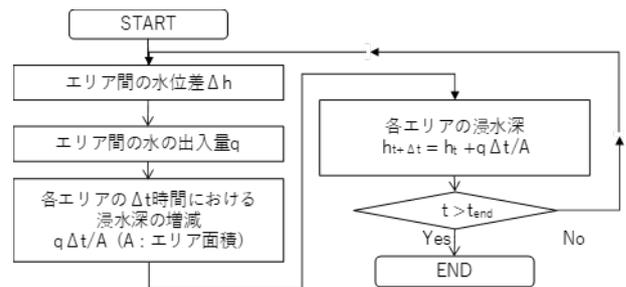


図-7 浸水解析のフロー
Fig.7 Flood analysis flow

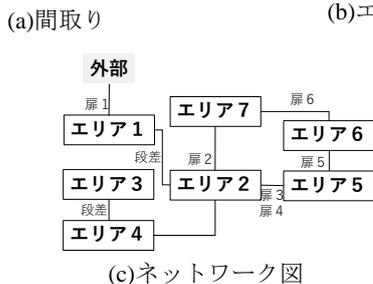
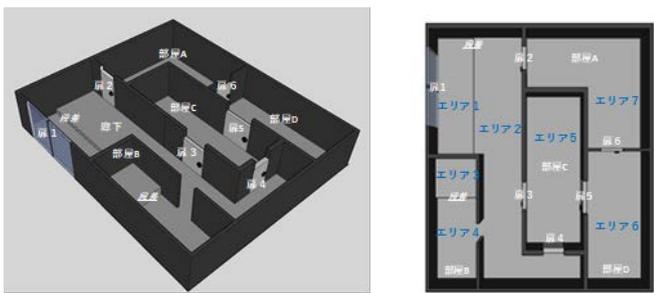
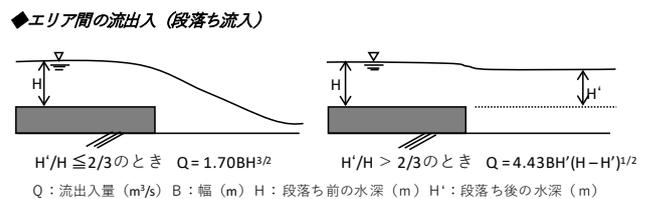
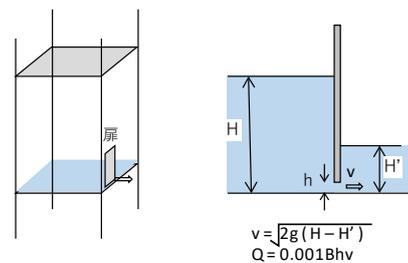


図-6 ネットワーク図の作成手順
Fig.6 Procedure of creating network diagram



◆扉の流出 (段落ち流入)



Q: 流出入量 (m³/s) B: 幅 (m) h: 扉の隙間 (mm) g: 重力加速度 (m/s²)
H: 扉の隙間から流出前の水深 (m) H': 扉の隙間から流出後の水深 (m)

図-8 浸水解析に用いる特性値例
Fig.8 Example of characteristic values used for flood analysis

するために 3 次元や平面図で可視的に示すとともに、エリアごとの浸水深の値を把握する時系列変化のグラフを作成する。

3. 解析事例

3.1 解析対象の概要

解析事例として、地上 8 階、地下 1 階（地下 2 階は貯水槽と駐車場）の鉄筋コンクリート造である大成札幌ビル（図-9 (a)）の間取りや部屋と廊下、部屋と部屋の間にある扉、配管やダクトなどを解析用にアレンジした解析用のモデルを BIM で作成した（図-9 (b)）。解析用のモデルは、地上部 1 階（1F, G.L.+0m）、地下 1 階（B1F, G.L.-5m）、地下 2 階（B2F, G.L.-10m）の 3 階構造である。また B1F 天井と B2F 天井には角ダクト（内寸 600mm×600mm）を設置した（図-10）。

3.2 流出・流入条件の整理とネットワーク図の作成

図-11 に各フロア、図-12 に B1F および B2F 天井部ダクトの平面図と 1F から B1F、B1F から B2F への流入箇所を示す。地上から 1F への流入箇所は、通用口の開放部（幅 2400mm、高さ 1800mm）、店舗横の扉底部にある 5mm の隙間（両方引き込み戸、幅 2100mm、高さ 1800mm）2 箇所とし、地上の 2 箇所のガラリ（幅

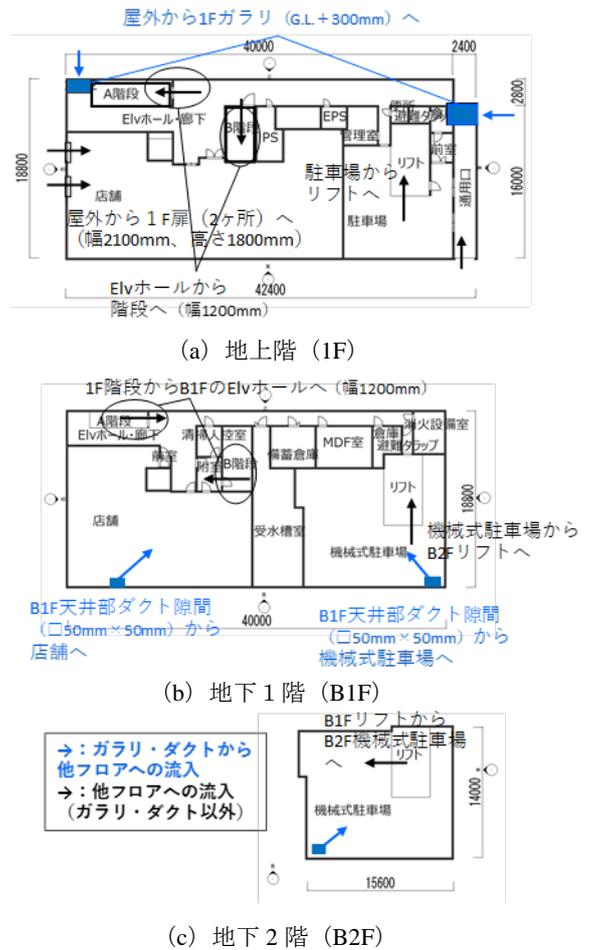


図-11 各フロアの平面図と流入箇所
Fig.11 Floor blueprint of each floor and inflow location

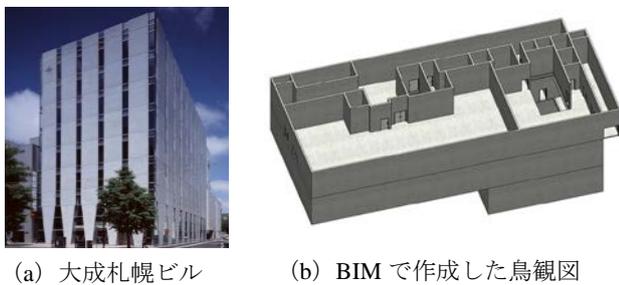


図-9 大成札幌ビルの外観と BIM で作成した鳥観図

Fig.9 Exterior of Taisei Sapporo Building and bird's-eye view created by BIM

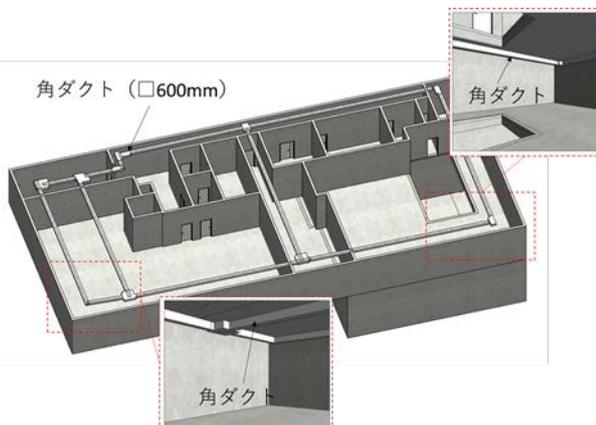


図-10 角ダクト設置状況 (B1F)
Fig.10 Square duct installation status (B1F)

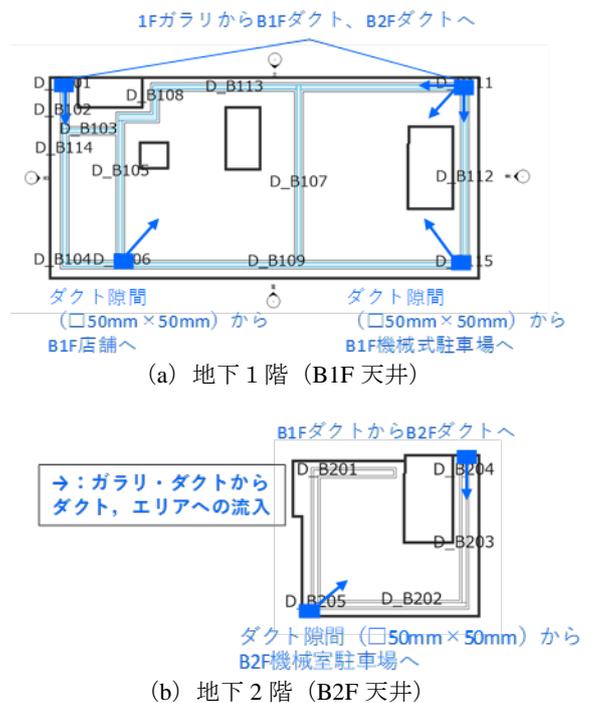


図-12 各ダクトの平面図と流入箇所
Fig.12 Blueprint of each duct and inflow location

600mm, ガラリ下端部の高さは地上から 300mm の位置) に流入した水は B1F 天井部の角ダクトに通じることとした。1F には店舗, 駐車場, エレベーターホール, 廊下, 駐車場のリフトなど 16 のエリアがあり, 部屋は全て扉が閉まっているが底部の 5mm の隙間から水が流入入することとした。エレベーターホールは同一フロアの複数の部屋の他に地下階へ通じる階段 (2 箇所) と接続しており, 駐車場は B1F につながるリフトに接続している。B1F は店舗, 機械式駐車場, 受水槽, リフトなど 15 エリアあり 1F から B1F への流入箇所は階段 2 箇所と機械式駐車場のリフトである。B2F は機械式駐車場とリフトの 2 エリアであり, B1F から B2F への流入箇所は機械式駐車場のリフトとした。1F のガラリから B1F 天井部の角ダクトに流入した水は, B1F 天井部のダクト内および B2F 天井部の角ダクトに流入することとした。なお角ダクトは水深が 30cm を超えると流入水の自重で一部が破損し, 30cm を超える水深の流量が地下階のエリアに流入する設定とした。設定では B1F 天井部の角ダクトが破損した場合は B1F の店舗および機械式駐車場に, B2F 天井部の角ダクトが破損した場合は機械式駐車場にダクト内の水が流入することとした (図-12)。

図-13 は本事例のネットワーク図である。同一フロアへの接続は実線, 他フロアとの接続は破線で示しており, 各フロア通しのつながりや水の流出入に関わる主要なエリアを視覚的に把握することができる。

3.3 入力データの作成

本事例では入力データは BIM で自動作成した。また本事例では屋外で 30 分かけて浸水深が 60cm となり, その後 1 時間浸水が継続したのちに浸水深が低減し始めて浸水開始から 120 分後には浸水深が 0cm となる単純な浸水条件を与えることとした (図-14)。なお排水ポンプは設置せず, 建物内に流入した水は全て B2F に貯まり排水されない設定としている。

3.4 特性値を用いた浸水解析の実施

本事例では, 建築設備の有無および止水対策の有無による浸水状況を比較するため, 表-1 に示す 4 ケースで解析を行った。

各ケースの地上からの流入箇所を図-15 に示す。case1 (図-15 (a)) と case2 (図-15 (b)) は建設設備である角ダクトへの水の流入を無視しており, case2 では地上部からの流入箇所のうち, 開放部 (幅 2400mm, 高さ 1800mm) に高さ 75cm の止水板を設置し浸水時の水の流入を阻止することとした。

case3 (図-15 (c)) と case4 (図-15 (d)) は角ダクト

からの水の流入を考慮しており, case4 では, 開放部に高さ 75cm の止水板を設置し, 角ダクトへ通じるガラリ (幅 600mm, ガラリ下端部の高さは地上から 300mm の位置) には止水対策を講じなかった。

すなわち, case1 と case2 は地上部が浸水した時に水の流入経路となるダクトを無視した解析であり, case3 と case4 はダクト内に水が流入し, かつダクト内の水の自重でダクトが破損して建物内に流入することを考慮したケースである。

3.5 解析結果の可視化

浸水開始から 30 分後における浸水深の鳥観図を図-16, 図-17 に示す。両図とも 1F~B2F の浸水状況を把握できるように断面を表示している。角ダクトへの水の流入を考慮した case3, case4 では, 角ダクト内に水が入っていることがわかる (図-16)。浸水深を比較すると, 角ダクト内の水の自重で破損し建物内に水が流入した case3, case4 の方が, 角ダクトへの流入を無視した case1, case2 より深くなっている (図-17)。

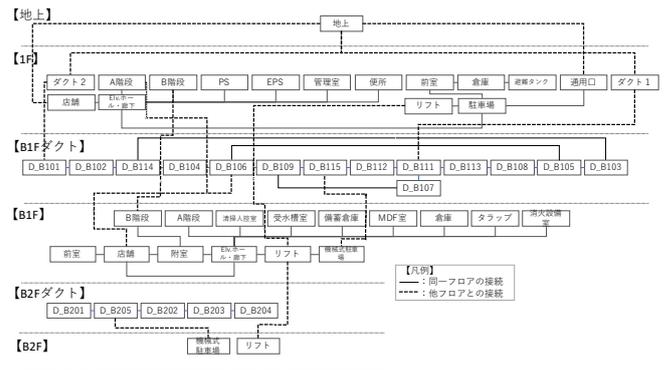


図-13 ネットワーク図
Fig.13 Network diagram

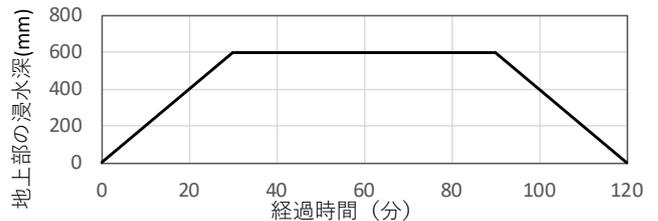
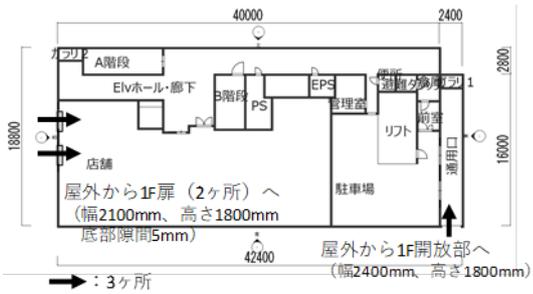


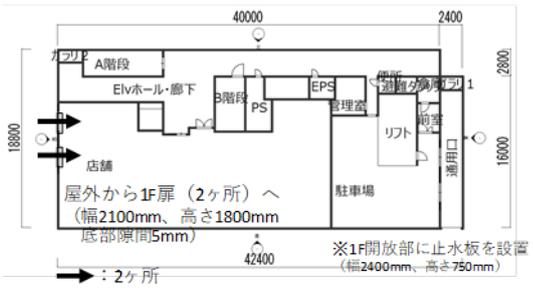
図-14 屋外における浸水深の時系列変化
Fig.14 Time series of flood depth above ground

表-1 計算ケース
Table 1 Calculation case

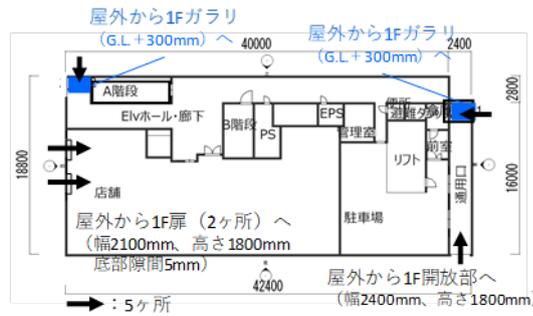
ケース名	建築設備 角ダクト (□600×600mm)	浸水対策	
		止水板(h=75cm) ガラリ	開放部
case1	無	無	無
case2	無	有	有
case3	有	無	無
case4	有	無	有



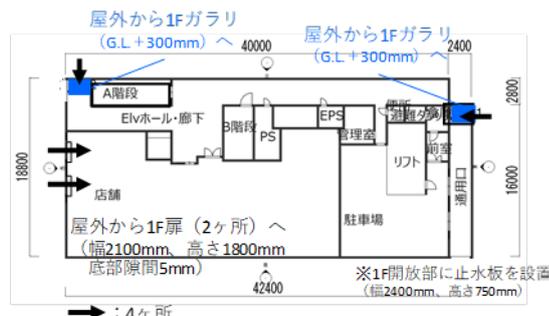
(a) case1:角ダクトへの流入無視, 止水対策無し



(b) case2: 角ダクトへの流入無視, 止水対策有り



(c) case3:角ダクトへの流入有り, 止水対策無し

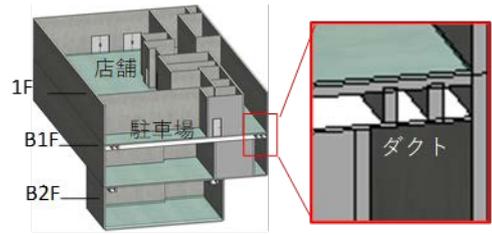


(d) case4:角ダクトへの流入有り, 止水対策有り

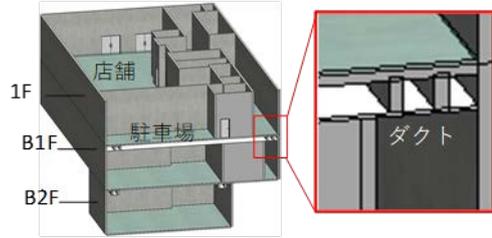
図-15 地上部から1Fへの流入箇所

Fig.15 Inflow point from above ground to 1F

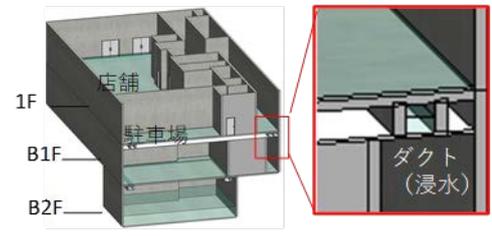
図-18は各エリアの浸水深を時系列のグラフで示したものである。1Fの店舗は、主に地上部と接続する扉の隙間から水が流入しており、浸水深は各ケースとも同様であった。B1Fの店舗における浸水深は1Fの階段およびB1F天井の角ダクトからの流入量が影響しており、60分後の水深を比較するとcase1は6.4cm、case2は3.6cm、case3は7.4cm、case4は5.2cmと止水板および



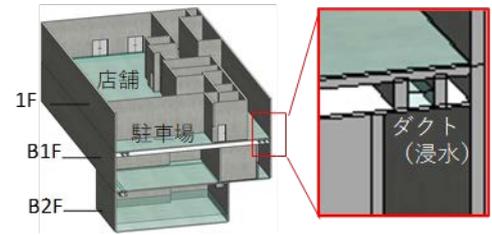
(a) case1:角ダクトへの流入無視, 止水対策無し



(b) case2: 角ダクトへの流入無視, 止水対策有り



(c) case3:角ダクトへの流入有り, 止水対策無し



(d) case4:角ダクトへの流入有り, 止水対策有り

図-16 各ダクトの浸水状況

(地上部の浸水開始から30分後)

Fig.16 Flooding status of each duct

ダクトへの流入の有無により差異はあるものの、浸水深は8cm以内であった。本事例では建物内に流入した水がB2Fに向かって流れ込むため、通過地点となるB1Fでは浸水深が低く、同一時刻、同一エリアにおける浸水深の差異が小さくなったと考えられる。これに対してB2Fの機械式駐車場における60分後の浸水深は、case1が0.8m、case2が0.1m、case3が3.0m、case4が2.3mとなり、B1Fに比べて浸水深が深かった。またcase1とcase2、case3とcase4を比較すると止水板を設置したcase2、case4の浸水深が低いため止水効果が確認できた。さらにダクトからの浸水の考慮の有無について比較すると、止水板を設置していないcase3はcase1の3倍以上、止水板を設置したcase4はcase2の

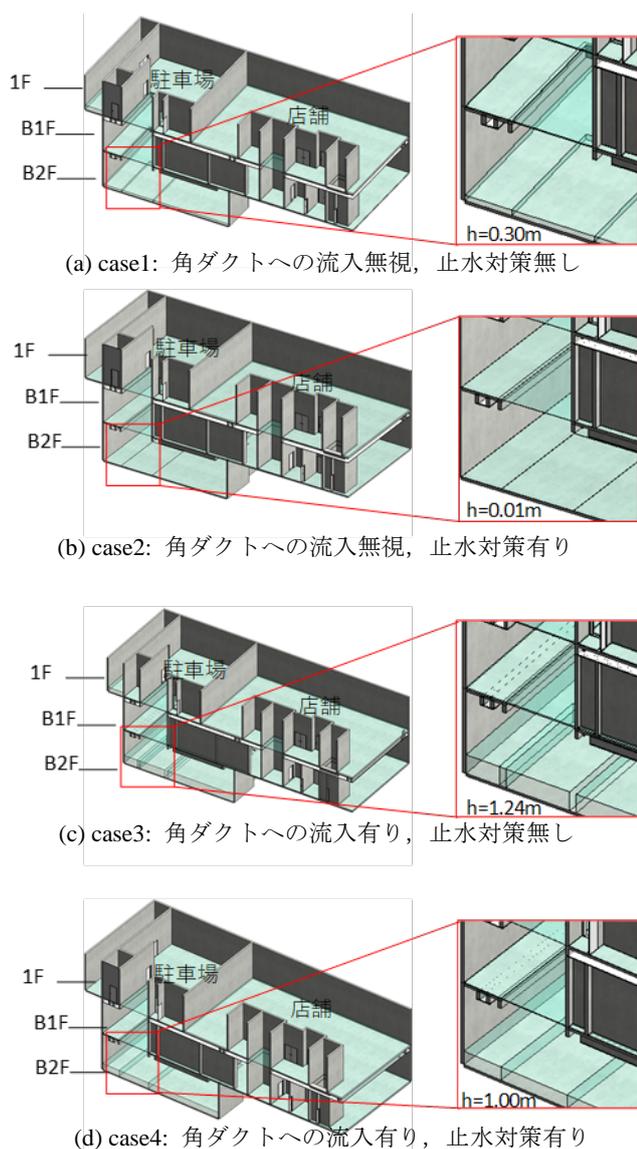
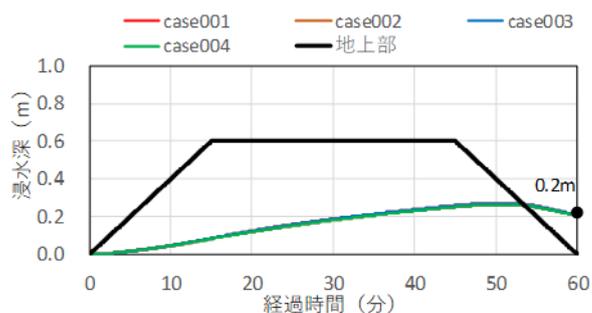


図-17 B2Fの浸水状況
 (地上部の浸水開始から30分後)
 Fig.17 Flooding status of B2F

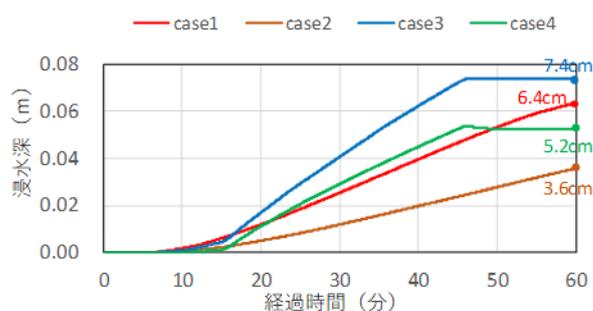
約 20 倍以上であり、角ダクトを考慮した case3, case4 が大きい値を示した。

以上の結果から、止水板を設置することで浸水深が低くなること、角ダクトから水の流入を考慮することで浸水深が深くなることを確認した。とくに角ダクトの考慮の有無により浸水深が大きく変わるため、実際の建物においても地上ガラリー部からダクトや配管などを介して水が流入することを想定した浸水対策を講じることが重要であることが示された。

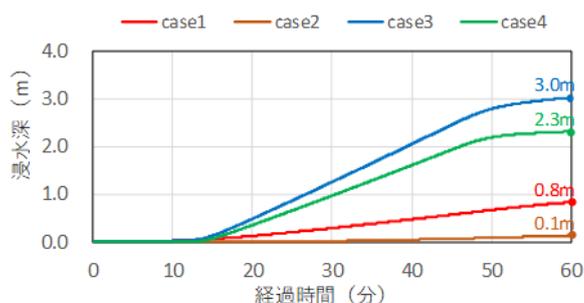
なお、図-18 で示した各エリアの浸水深の時間変化だけでは、エリア間の水の流出入状況や浸水経路を把握することは困難であり、図-16, 図-17 などの鳥瞰図を動画にすることで、浸水深の変化や浸水経路を時系列で把握でき、関係者との情報共有や合意形成が容易になると考える。



(a) 1F 店舗



(b) B1F 店舗



(c) B2F 機械式駐車場

図-18 浸水深の時系列変化
 (1F 店舗, B1F 店舗, B2F 機械式駐車場)

Fig.18 Time series of flood depth

4. おわりに

本稿では地下階を有する建物を対象に浸水解析を実施し結果を可視化する浸水リスク評価・診断システム「T-Flood® Analyzer」を紹介した。本システムは建物への流入口となる扉の幅や隙間の大きさ、建物内のダクトにつながるガラリーの高さや幅、建物内部の部屋の面積、部屋間の接続状況、各部屋の高さの他、他階への接続方法、角ダクトや配管などの配置などを浸水解析の入力値として浸水解析を実施し、浸水経路や浸水深を任意の視点の鳥瞰図により確認できるものである。事例として地上部のガラリーから角ダクト(□600mm×600mm)に水が流入し、水の自重でダクトが折れて建物内(1F, B1F, B2Fの3フロア)に流入することを考慮した浸水解析を実施した。その結果、角ダクトを無

視したケースに比べて、角ダクトから水の流入を考慮したケースの方が浸水深が深くなっており（本事例では 3 倍以上）、また主要な流入箇所のみ止水板を設置し、角ダクトへの止水対策は講じなかった場合においても最下段（B2F）の浸水深が深くなることを確認した。本結果から、実際の建物においてもダクトや配管などの設備を介して水が流入することを想定した浸水対策を講じることが重要であることが示された。

本システムは浸水解析を実施し、解析結果を可視化するだけでなく、浸水対策に用いる防水扉や止水板などを設置・変更できる。そのため、複数の対策案の比較や評価、止水効果が高い対策の検討などが可能であり、最適な浸水リスク対策案や事業継続計画の策定を支援するツールとして活用できる。また本システムは BIM, CAD, 紙情報のいずれにも対応しており、解析結果を可視化できることで、関係者間で浸水状況や浸

水リスク情報の共有を容易にできる等、合意形成ツールとして有効である。

今後は新築や既存の建物を問わず、最適な浸水リスク対策案や事業継続計画の策定を支援するツールとして活用・展開する予定である。

参考文献

- 1) 気候変動による水害研究会：激甚化する水害，日経 BP 社，2018.
- 2) 国土交通省：水防法等の一部を改正する法律が施行されました，<https://www.mlit.go.jp/river/suibou/suibouhou.html>（2020.7.1 参照）.
- 3) 国土交通省水管理・国土保全：水防法などの一部を改正する法律が施行されました，https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/mizukokudo02_tk_000001.html（2020.7.1 参照）.
- 4) 戸田圭一，井上和也，大八木亮，中井勉，竹村典久：複雑な地下空間の浸水実験，水工学論文集，第 48 巻，pp.583-588, 2004.