

BIM を用いた地下街施設管理の可能性 —水害対応マネジメントを中心に

A BASIC STUDY ON FACILITY MANAGEMENT WITH BUILDING INFORMATION MODELING FOR UNDERGROUND FACILITIES —CENTERING ON THE RESPONSES TO INUNDATION

小林 佑大^{1*}・秀島 栄三²・河原 健太郎¹

Yuta KOBAYASHI^{1*}, Eizo HIDESHIMA², Kentaro KAWAHARA¹

Flooding from Hurricane Sandy in New York City reminded us of the importance of complete responses to inundation in underground facilities. Behavior of user and spatial relation with the neighboring facilities should be considered sufficiently as well as inundation flow control, in order to minimize the loss of social assets from the disasters. For the purpose of improving the facility management, it must be significant to use the BIM, that is, *building information modeling*, enabling three-dimensional visualization of dynamics of entities including human behaviors in facilities through making plan to maintenance activities. This study formulated a model which was integrated from inundation simulation and computer graphics, and evaluated the responses to inundation in underground facilities. It concluded that the BIM is useful to managing inundation in underground facilities.

Key Words : BIM, facility management, inundation, underground space

1. はじめに

人口や社会インフラが集積する都市域では、限られた土地を有効に活用するため、地下鉄や地下街など地下空間への広がりが必要である。地下空間の防災については火災や震災への対応が先行してきたが、2012 年に起きたハリケーンサンディによるニューヨーク都市圏大水害は、地下空間の浸水被害の危険性を世界的に知らしめた。日本でも 1999 年に福岡の地下街の浸水事故、2000 年に東海豪雨による大規模な都市水害が発生し、これらを契機に地下空間での水害対策のガイドライン策定などが進められてきた。地下空間における浸水被害は地上や周辺施設との接続関係や、施設の形状などにより千差万別であり、また閉塞的な空間に特有な人々の意識や行動を踏まえるなど、様々な視点から配慮するような総合的な施設管理を実行することが求められる。

ところで昨今 BIM(Building Information Model)の開発が進められている。BIM とはコンピュータ上で建物の三次

元モデルに形や大きさ、材質といった属性情報を統合しながら設計、施工、維持管理などを進めていく新しい手法である。BIM はいわゆる 3 次元可視化の側面に加え、施設の構造強度、水の流れ、交通動線などを電子的に取り込み、これらに係る分析や検討を容易にする。地下空間と水害の関係を記述したり理解する上で BIM は有効と考えられる。近年では土木構造物を対象とするものについては国土交通省が先頭に立って CIM(Construction Information Model)と呼んでいる。

本研究では、様々な原因で起こりうる地下街空間の浸水被害への対応を中心にして地下街施設の総合的な施設管理に、上述の BIM の適用が有効と言えるか、その可能性について検討することを目的とする。

2. 地下空間の浸水被害

都市域の地表面はアスファルトやコンクリートで覆わ

キーワード: BIM, 施設管理, 浸水, 地下空間

¹学生会員 名古屋工業大学修士課程 大学院工学研究科 Master Course Student, Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology,
(E-mail: cju19513@stn.nitech.ac.jp)

²正会員 名古屋工業大学教授 大学院工学研究科 Professor, Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology

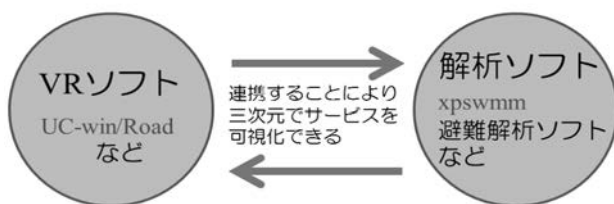


図-1 ソフト間の関係

れ、雨水排除は下水道などの雨水処理施設に強く依存することとなった。他方、地球温暖化の影響により短時間に、局地的に、大雨を降らす集中豪雨の発生回数が増加している。集中豪雨は降雨強度が非常に大きく、これまで整備されてきた都市の排水システムでは十分に対応できなくなっている。集中豪雨が発生すると処理しきれない水は地上に溢れ、より低い位置にある地下空間に流れ込んでいく。地下空間はしばしば駅、商店街、ビル地階など多様な施設が複雑に組み合わさることで形成されており、防災の観点からみると水害発生後の状態を予想することが難しい。

これまでも地下空間の水防災に関していろいろな研究が行われている。石垣らの研究¹⁾では実物大模型を用いた避難体験実験に基づいて避難困難度指標を提案している。関根²⁾らは避難に関する数値シミュレーションを行い、地下空間における避難誘導に関する考察を進めている。

本研究では地下空間の施設管理という視点から水害を捉える。地下空間には地下鉄駅やビルの地階など異なる種類の施設があるが、地下街は通勤、通学、買い物といった様々な生活の中で利用され、身近な空間の一つと言える。また地下街は多数の店舗を持ち、商業エリアとして機能している。これらは防災の観点からも、施設機能の観点からも地下施設の中でも特徴的であると言え、人的被害や商業機能など多方面からの検討が必要である。そこで地下街空間の三次元モデリングと浸水シミュレーションを融合したモデルを構築し、このモデルを用いた諸分析を通じて地下街空間を対象とする総合的な施設管理の在り方を検討する。

3. BIMを用いた地下街のモデリング

BIM を謳って地下街の浸水過程を表現し、分析するソフトウェアは今のところ存在しない。本研究では、三次元バーチャルリアリティソフト UC-win/Road を使用し、これに雨水流出解析ソフト xpswmm で解析した浸水

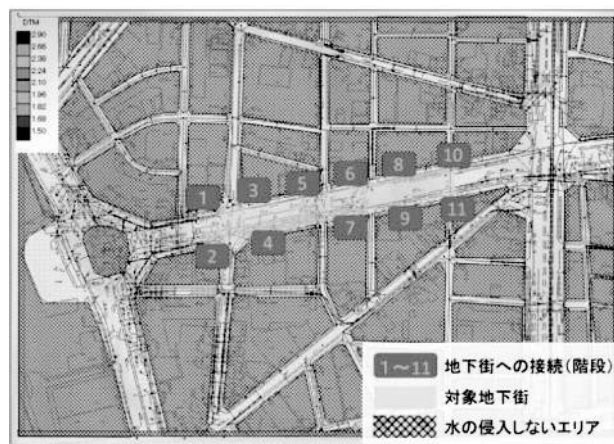


図-2 地表面解析で対象とするエリア

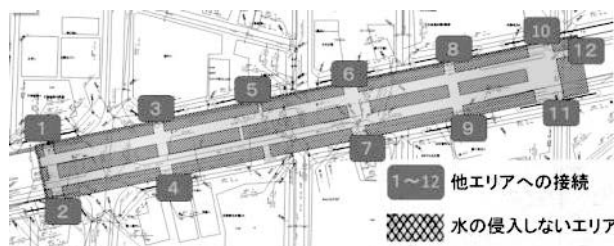


図-3 浸水解析で対象とするエリア

情報を統合し、三次元で表現する。UC-win/Road と xpswmm を用い、施設の形状、地理的条件、降雨パターン等を統合的に考慮した地下街モデルを作成する。後述するソフトウェアの制約を除けば、BIM で実現するものと同じ状況になる。図-1 に使用するソフトウェアの相互関係を示す。

想定した地下街では地上に一般道路があり、地下1階に対象とする地下街、地下2階には地下駐車場、電気設備等がある。地下街には飲食や小売り、サービスなど様々な業種の店舗が入居している。また地下街は地下鉄駅（改札階）に隣接している。

地下街の浸水は地上の氾濫状況により流入箇所や規模が異なるため、地上と地下街を統合した解析を行うことが望ましい。しかしソフトウェアに制約があり、地上と地下街を同時に解析することができない。そこで地下街に浸入する水の流入量を測定する地表面解析と地下街へ流入した水の浸水プロセスを解析する浸水解析の2つに分けることにより対応することとした。

地表面解析では地下街への浸水は階段からのみ流入するものとし、階段への流入量を算定する。本解析では図-2 に示した 11 か所の階段からの浸水を想定し、各階段に水の流入口を設置した。降雨により地上に水があふれ、設定した高さに到達すると流入口から水が流れ込むものとする。地下街への水の流入は、地上で雨水が処理施設によりどれだけ排除されるかに影響を受ける。流入量を

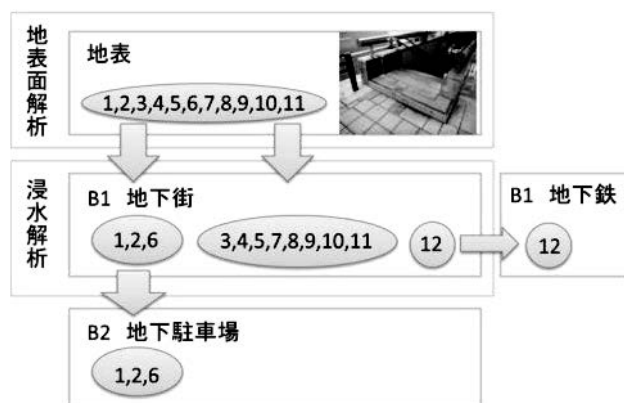


図-4 浸水解析モデルの概念図

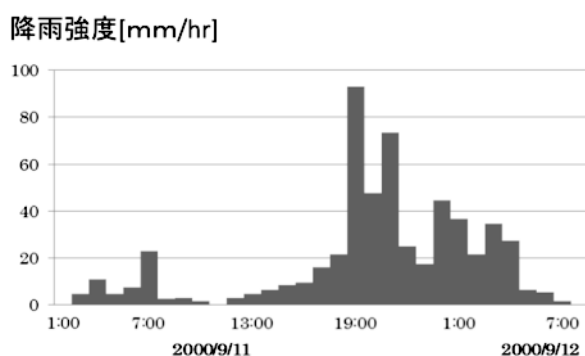


図-5 東海豪雨の名古屋での観測雨量

算定するには雨水処理施設の排水能力を考慮する必要がある。そこで今回の解析では下水道の排水能力相当の降水量から除くという方法で考慮した。

浸水解析では地下街のフロアを 1m メッシュに分割し、2 次元不定流により解析する。図-3 は浸水解析を行う地下街のエリアを示している。地下街の傾斜は入手した設計図から作成している。また浸水解析では流入した水は階段 1, 2, 6 から地下 2 階にある地下駐車場に流れ、階段 12 から隣接する地下 1 階の地下鉄（改札階）に流れ出るものとした。浸水解析の概念モデルを図-4 に示す。番号は各階段に割り振ったものを表し、矢印は水の動きを示している。

外力条件として 2000 年の東海豪雨を降雨パターンを想定する。図-5 に東海豪雨の降雨量を示す。想定に用いた地下街が実在する自治体では、1 時間 60mm の降雨に対処できるよう雨水整備が進められている。しかし実際には落ち葉により側溝がつまる、地上を走る車の走行により波が生じる、などの原因により想定通りの排水機能を発揮できるとは限らない。また、地下空間の浸水対策には出入口のマウンドアップや止水板の設置、土嚢の用意などがある。このような浸水対策の有無により浸水被害は大きく異なる。そこで雨水処理施設の排水機能が何らかの原因により低下しているものとし、排水能力を

表-1 各 CASE の概要

	排水能力 (mm/h)	浸水対策
CASE1	30	無
CASE2	30	有

表-2 避難困難度指標

	安全な避難限界	救助なしでの避難限界
男性	0.125	0.25
女性	0.1	0.2

表-3 各業種の店舗概要

業種	事業所数	従業者数
卸売・小売業	61	403
飲食店・宿泊業	14	93
医療・福祉	2	13
サービス業	7	46
合計	84	555

30mm/h と想定した。これに浸水対策がある場合とない場合の 2 ケースに対して浸水解析を行う。この 2 ケースを取り上げることで浸水が拡大していくプロセスや地下街の浸水対策の効果などについて考察することができる。浸水対策は流入口の高さを変更することで表した。表-1 に各ケースの概要を示す。

4. 解析に基づく浸水被害の検討

(1) 検討の概要

解析に基づき地下街の浸水過程とその対応のあり方について考察する。本稿では主に人的被害と商業施設に係る被害について考察する。

人的被害の検討では、浸水から無事に避難できるかを検証する。地下空間における避難に関する既往の研究¹⁾では、流速 u と水深 h を用いて避難困難度を $M_o = u^2 h / g + h^2 / 2$ と表している。この研究による避難困難度指標を表-2 に示す。避難困難度評価により浸水による避難可能エリアの推移を考察する。また階段での避難は地下空間浸水時の避難・救助システムに関する研究³⁾に則り、地上水深 30 cm を成人が階段を昇ることができる限界とする。地上水深と階段付近の避難困難度評価の 2 つの項目から階段を用いた避難を検討する。

商業施設に係る被害の検討では、商品や機材等の資産が浸水する等の直接被害と、浸水及び復旧に伴う営業停止などの間接被害を考慮する。事業所数、事業者数は自治体で公表している統計資料を参考とした。表-3 に店

表-4 被害額算出に用いるパラメータ

業種	償却資産 23年評価額 (千円/人)	在庫資産 23年評価額 (千円/人)	付加価値額 16年評価額 (千円/人)
卸売・小売業	2147	4143	23.197
飲食・宿泊業	1837	159	23.540
医療・福祉	1450	52	23.540
サービス業	4537	321	23.540

表-5 被害額算出に用いるパラメータ

浸水深	50 cm未満	50～99 cm	100～199 cm
資産償却	0.232	0.453	0.789
在庫償却	0.128	0.267	0.586
停止日数(日)	4.4	6.3	10.3
停滞日数(日)	8.8	12.6	20.6
代替活動等 支出負担単価 (千円/事業所)	925	1714	3726

舗の業種ごとの概要をまとめる。国土交通省によりつくられた治水経済調査マニュアル⁴⁾に基づき、事業所償却・在庫資産被害額(以下、資産被害額とする)、営業停止損失、応急対策費用の3点に関して以下の計算式により算出する。

○資産被害額＝(従業者1人当たりの償却資産評価額×償却被害に対する浸水深別被害率＋従業者1人当たりの在庫資産評価額×在庫被害に対する浸水深別被害率)×従業者数

○営業停止損失＝(営業停止日数＋営業停滞日数)/2×付加価値額×従業員数

○応急対策費用＝代替活動等支出負担単価×事業所数

浸水深別被害率については、地下街に対応するものは作られていないため、床上浸水の場合と同じ値をとるものとする。治水経済調査マニュアルには「地下街にある資産の被害額を算定することに当たって通常の被害率を用いた場合かなりの過小評価となる」という一文があり、被害額としては低く見積もっていることに留意する必要がある。表-4、5に計算に用いる各パラメータをまとめる。

(2) CASE1の検討

図-6にCASE1における浸水解析の結果を、図-7に、図-6の水深と流速の関係についての色分けと矢印の凡例を示す。東海豪雨の降雨パターンに沿って降雨が激し

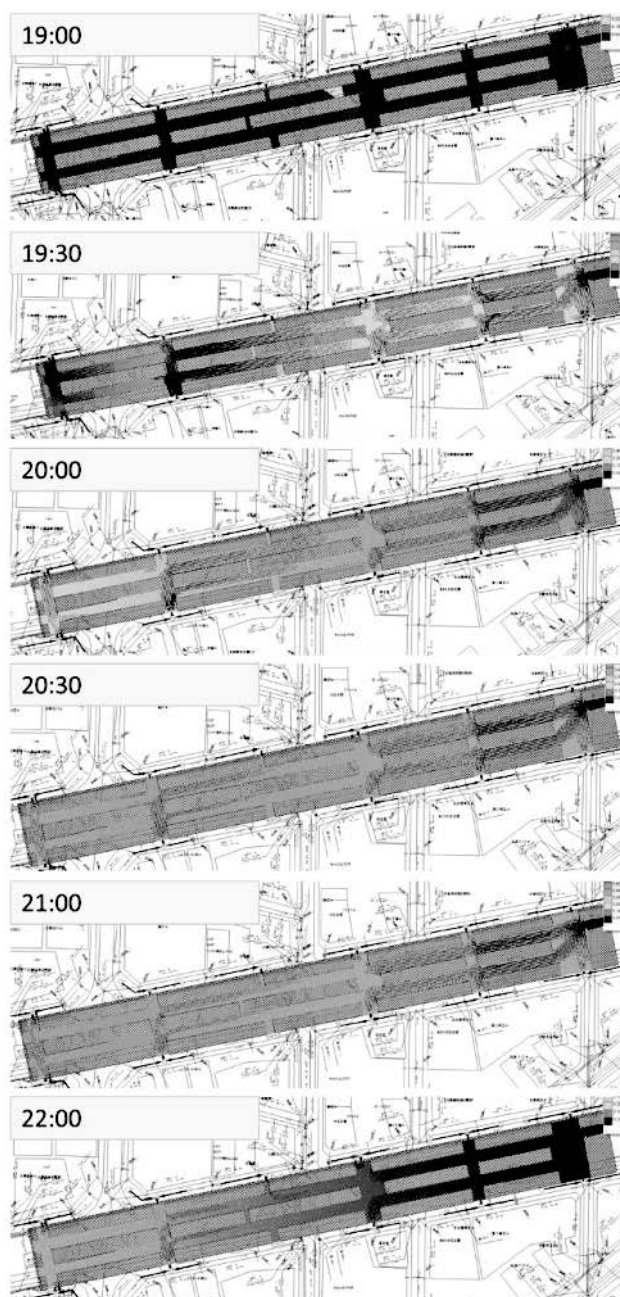


図-6 CASE1の解析結果

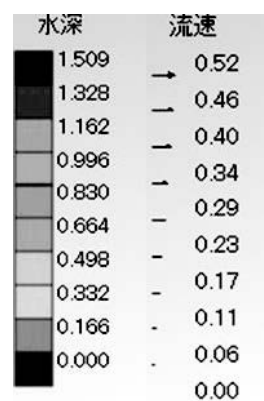


図-7 CASE1の水深と流速の凡例

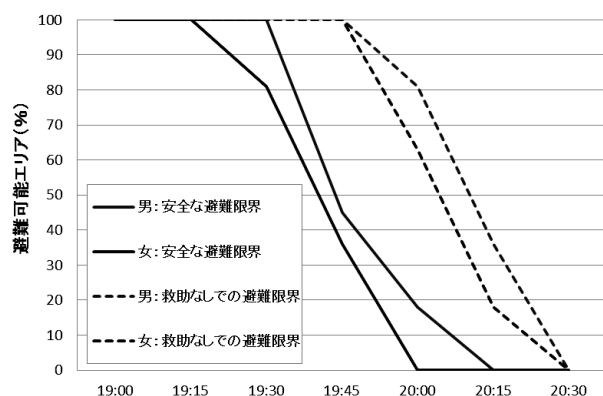


図-8 CASE1における避難可能エリアの推移

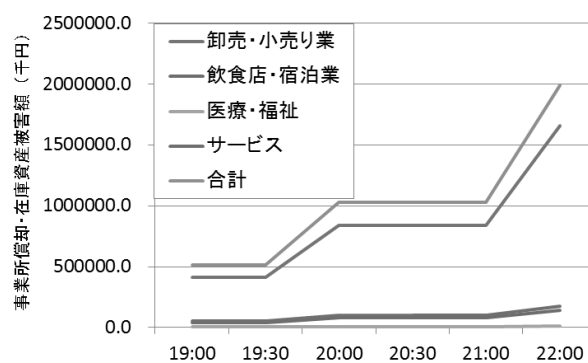


図-10 資産被害額の推移

表-6 CASE1における階段の使用可能性

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
19:00	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
19:30	×	○	○	×	○	○	○	○	○	×	△
20:00	△	△	△	×	△	△	△	×	×	×	×
20:30	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
21:00	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
22:00	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

○：安全に避難可能 △：救助なしで避難可能 ×：避難不可能

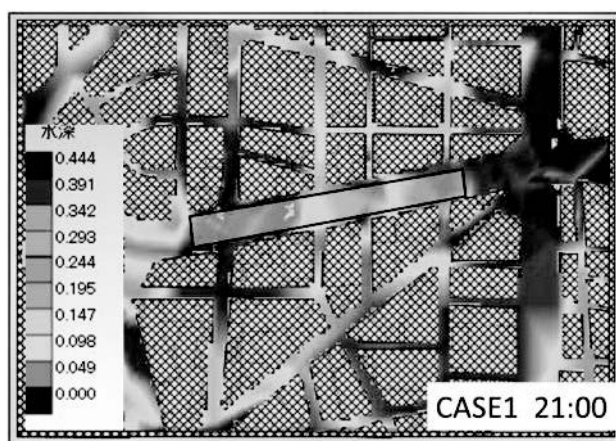


図-9 地表面解析結果

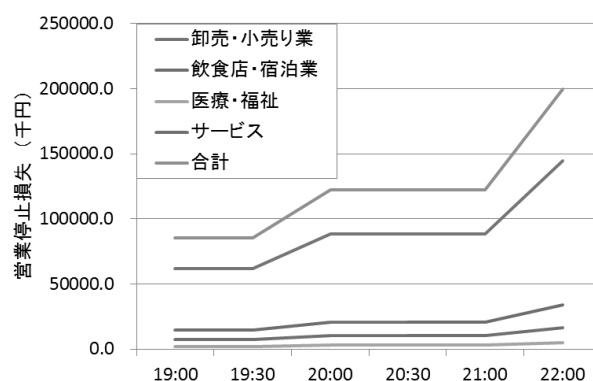


図-11 営業停止損失の推移

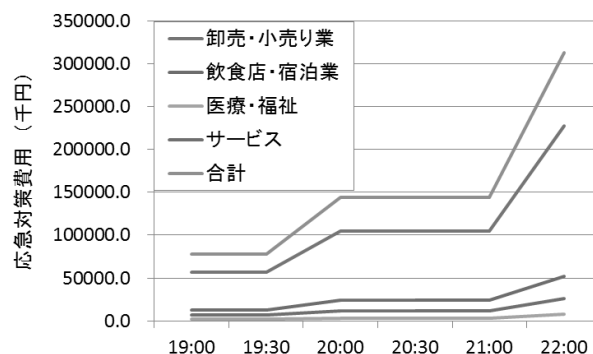


図-12 応急対策費用の推移

くなる 19:00 から浸水が始まり、早いところでは浸水開始後 30 分程で浸水深が 50 cm 近くまで達するところが見られた。3 時間経過したピーク時には 150 cm の浸水深となり、その後隣接する地下鉄や駐車場へ流れ出ることで水深は下がる。

以上の想定のもとでの地下空間における人的被害に関する検討を行う。先に示した避難困難度を用いて成人男性・成人女性それぞれの避難可能エリアの推移を図-8に示す。避難可能エリアは30分経過後、急速に減少し、1 時間後にはほとんどのエリアで安全な避難ができない。また階段での避難の可能性について表-6にまとめる。地表面解析の結果により各階段での流入量を算出したが、標高などの違いから、階段によって流入量が異なり、階

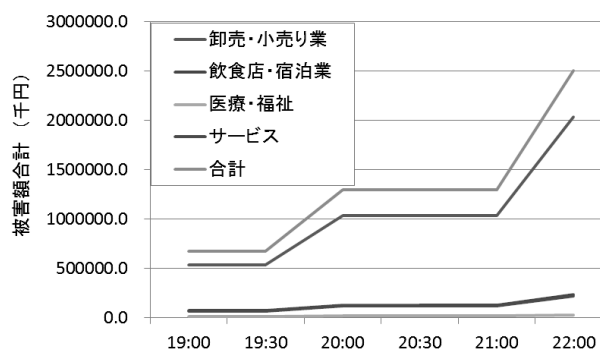


図-13 合計被害額の推移

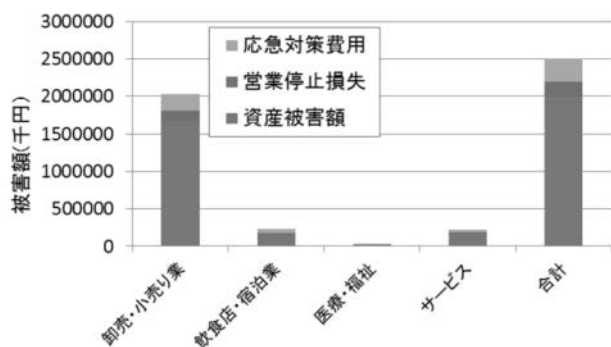


図-14 CASE1の業種別被害額

表-7 従業員一人当たりの資産被害額(千円)

	卸売・小売業	飲食店・宿泊業	医療・福祉	サービス業
50 cm未満	1028.4	468.6	366.9	1340.5
50～99 cm	2078.8	874.6	670.7	2141.0
100～199 cm	4121.8	1542.6	1174.5	3767.8

段1, 4, 10などでは他と比べ早い段階から避難が不可能となった。地下街への流入量が最も大きくなる21:00の地表面解析の結果を図-9に示す。図中の左下に水深の色分けの凡例を示し、図中の黒枠が地下街の範囲を表す。

次いで商業施設に係る被害の検討を行う。図-10, 11, 12, 13に資産被害額、営業停止損失、応急対策費用、合計額の推移について、図-14に業種別被害額についてまとめる。19:45 ごろに平均浸水深が50cmを超え、21:10ごろに平均浸水深は100cmを超えた。浸水量の増加と共に被害額が増加していく。業種別被害額では店舗数及び従業員数に応じて大きく差がついた。また営業停止損失と応急対策費用に関しては一従業員当たり、一店舗当たりの業種による被害額の差はあまり見られなかったが、資産被害額については業種による差が大きく出た。表-7に従業員一人当たりの資産被害額を示す。これにより卸売・小売業では店舗数・従業員の地下街に占める割合は72.6%だったのに対し、被害額では77.7%を占めた。店舗に在庫等を保管しなければいけない卸売・小売業では特に浸水に対する被害が大きいことが分かる。また一人あたりの償却資産評価額の高いサービス業も被害額が大きく100 cm未満の場合では、卸売・小売業よりも被害が大きくなることが確認できた。対照的に飲食店・宿泊業、医療・福祉では比較的被害額が少なかった。最終的に被害総額は25億円にも及んだ。

(3) CASE2の検討

CASE2 における浸水解析の結果を図-15 に、図-16 に、図-15 の水深と流速の関係についての色分けと矢印の凡例を示す。CASE2 では階段 1 からのみ浸水が生じた。こ

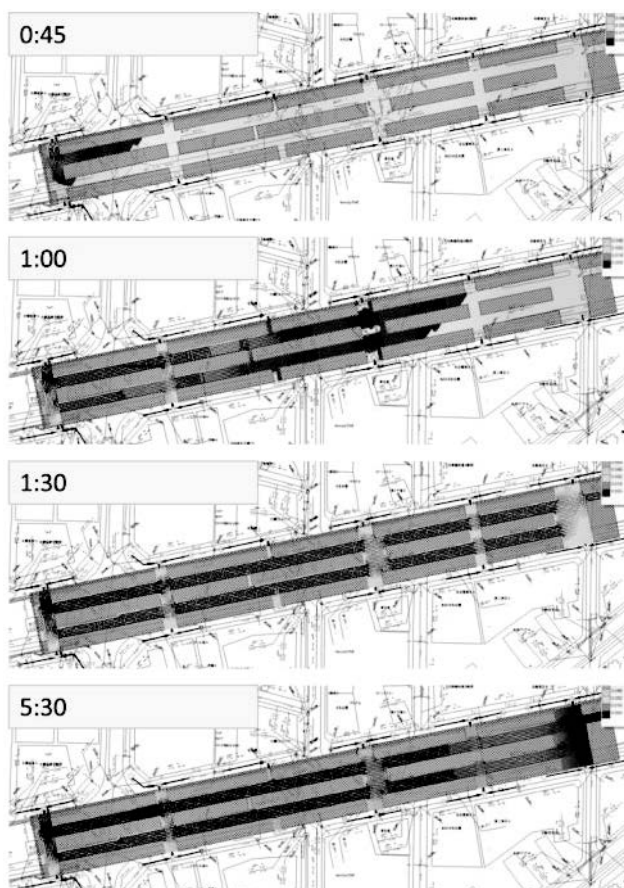


図-15 CASE2の解析結果

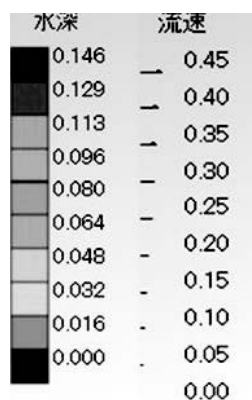


図-16 CASE2の水深と流速の凡例

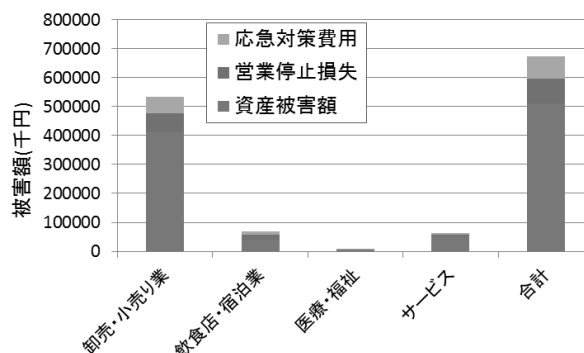


図-17 CASE2の業種別被害額

の浸水は最も強い降雨強度を記録する 19:00 からではなく降雨の落ち着いた 0:40 から流入が始まり、浸水は降雨から遅れて生起することが確認できた。浸水開始後緩やかに流入し続け、05:30 頃に最大浸水深 15 cm 程度となった。

人的被害に関する検討を行う。避難困難度評価を行ったところ最大の値でも 0.015 と低く、避難に関して問題は見られなかった。階段の使用に関しても、階段 1 では浸水が見られたため使用するの戸惑われると考えられるが、その他の階段では使用するに問題はないと考えられる。

商業施設に係る被害は図-17のような結果になった。CASE1と比較すると被害額は7億円を下回り、大きく抑えることができた。1999年に起きた福岡市の地下街の浸水事例では、浸水深は10-15cmほどであり、一部の店舗でのみ商品被害が発生した。また排水作業や被災後の片づけ、水損設備の仮復旧などで地下街の店舗は2日間ほど営業が不可能な状態が続いた。治水経済調査マニュアルでは被害の判断基準を50cm以下としており、福岡市の事例を考えると、本研究におけるCASE2での被害額は、より少なくなると考えられ、被災額の算出方法に改善の余地があると言える。

5. 施設管理の視点から見る地下水害とBIM適用の可能性

本章では、前章での浸水過程のモデリングおよび分析を踏まえ、施設管理への BIM の適用の可能性について考察する。

いかなる施設も適切な整備をし続けることが求められており、その整備のための投資が諸施設の機能水準、施設価値に変化をもたらすことが考慮されるべきである。本研究では CASE1 と CASE2 を比較することで、浸水対策によって施設の防災機能、施設価値を大きく向上させることが可能であることを確認した。局所的な降雨や自動車の走行によって生じる波が浸入するなど様々な原因によって地下街は浸水する。そうしたことを踏まえて様々な状況を想定した分析を行うことで施設管理に係る新たな知見を導き出すことが可能と言える。

従来の解析では浸水プロセスを俯瞰的に確認するやり方が主流である。本研究で用いた地下街空間モデルでは三次元都市空間に解析の結果を反映することで、俯瞰的な捉え方に加え、自由な任意の視点から浸水プロセスを確認することができる。図-18 では地下街の歩行者が避難する様子を示している。地下空間は施設が複雑に組み合わせることで形成されており、水害発生後の状態を予

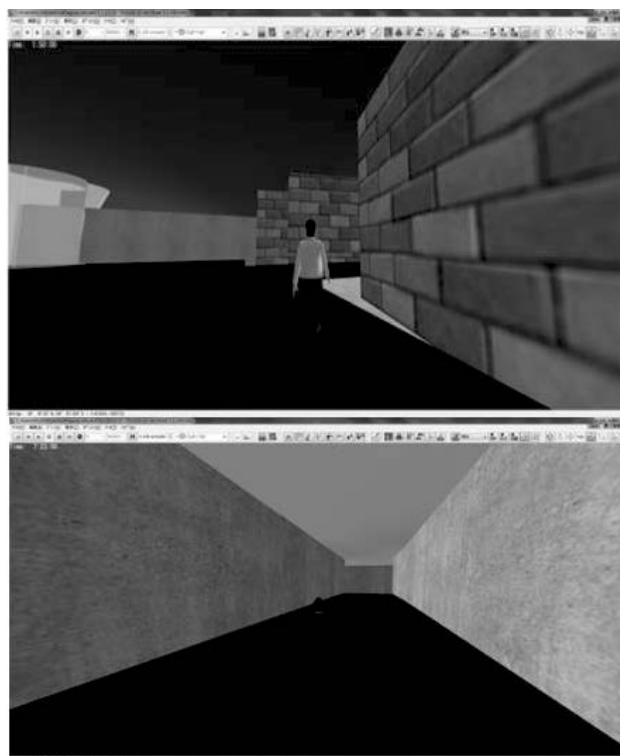


図-18 三次元的に表現された地下街

想することが難しい。三次元的に可視化することにより、危険個所の理解が容易となり、管理者や関係者がイメージを共有しながら浸水対策を検討することができるであろう。本稿における解析では、隣接する地下鉄駅（改札階）や地下駐車場への影響を確認できた。こうした浸水のプロセスを捉えるに、単一の施設のみに目を向けるだけでは不十分であり、周辺の施設を含む視点から、一体的な対策を検討するべきであろう。関係者間で連携して対策を検討する際に BIM の 3 次元的可視化の機能は大変有用と言える。

作成した BIM モデルの地理的条件や施設形状は、避難解析や空調シミュレーション、エネルギー解析など他の解析にも転用できるだろう。このように様々な解析により多方面から施設の在り方を考察することが施設管理の総合性の向上に寄与するものと考ええる。

6. おわりに

本稿では、BIM を用いた地下街の施設管理の可能性について考察した。今後、ますます都市水害の発生が予想されるなか、総合的な施設管理手法の構築は急務と言える。本研究で構築したモデルは、止水板の設置に要する時間との兼ね合いや、階段における水流の動きなどを考慮しておらず、今後改良すべき余地がある。また

BIM の発展的な使用方法として、浸水シミュレーションに避難解析シミュレーションを連動させ、水の挙動だけでなく人の挙動も捉えることによって施設管理をさらに高度化させることが考えられる。

参考文献

- 1) 石垣泰輔・戸田圭一・尾崎平・馬場康之・井上和美:
内水氾濫時における大規模地下空間と避難, 京都大学
防災研究所年報, 第 54 号 B, 2011.
- 2) 関根正人・本山量啓:地下空間浸水時の避難誘導に関
する数値解析, 水工学論文集, 第 52 卷, 2008.
- 3) 土木学会地下空間研究委員会防災小委員会: 地下空間
浸水時の避難・救助システムに関する研究, 2006.
- 4) 国土交通省河川局: 治水経済調査マニュアル(案),
2005.
- 5) 社団法人土木学会: アセットマネジメント導入への挑
戦, 技法堂出版, 2005.
- 6) 秀島栄三: 公共施設管理へのサービスの視点の付与に
関する研究日比科学技術振興財団 生活環境向上のた
めの研究報告書 Vol.14 pp.71-86,2012.