

地上・地下を統合した都市水害モデルによる 神戸市の地下街浸水解析

UNDERGROUND INUNDATION ANALYSIS IN KOBE CITY BY THE URBAN FLOOD MODEL CONSIDERING BOTH GROUND AND UNDERGROUND SPACES

戸田圭一¹・川池健司²・深草新³・山本大介³

Keiichi TODA・Kenji KAWAIKE・Shin FUKAKUSA・Daisuke YAMAMOTO

An inundation flow model is developed which can treat inundation in both ground and underground spaces. We combine a 2-D inundation model based on unstructured meshes with an underground inundation model by use of pond model. A runoff model based on the kinematic wave model is also incorporated. This model enables us to predict underground inundation by imposing rainfall condition in an urban river basin. This model is applied to Sannomiya area and Sannomiya underground mall in Kobe City, Japan. As a result, it is found that the underground mall there is likely to be dangerous in inundation by heavy rainfall such as that observed in Tokyo in September 2005. It is also found that step at each entrance is one of the effective measures to reduce the risk at underground inundation.

Key Words: underground mall, urban flood, underground inundation, inundation analysis, step

1. はじめに

集中豪雨による都市域での水害, 都市水害が顕在化してきている。都市水害の中でとくにやっかいな事象は氾濫水が地下空間に流入する地下浸水である。地下空間は都市の最深部に位置し, 地上の氾濫水が集中してくる場所であり, また地上に比べてその面積(体積)が小さいため, 平面部では浸水深が急激に増大するとともに, 避難経路の階段から水が流入してくるため, 地下からの避難は大変厳しいものとなる¹⁾。よって地下浸水では人命が失われる可能性があり, その予測と対策は, 都市域の安全を考えるにあたっての重要課題の一つであると言える。

地下浸水を予測するにあたっては, (a)大雨時の河川の増水による外水氾濫あるいは短時間豪雨を吐ききれずにおこる内水氾濫によって, 地下空間のどの入口からどの程度, 氾濫水の流入が起こるか, ということ, (b)いったん流入した氾濫水が地下空間内でどのように拡がるか, ということを連続して表現できると大変都合がよい。すなわち, 外力として降雨を与えることにより, 対象とする都市域内の地下浸水の様子が詳細に予測できることとなる。また, そのモデルを用いて種々の対策を施した条件で解析を行うことにより, それら対策の効果を具体的に議論することが可能となる。

本報は, 上に述べたような, 降雨とその流出から, 都市域の地上での氾濫, さらに地下空間での浸水の拡がりに至る一連の過程を解析できるモデルを構築したものである。そして, そのモデルを, 神戸市の三宮地下街を含む都市流域に適用した解析結果を紹介する。さらに, モデル解析により, 短時間豪雨時の地下浸水対策として, 段差(ステップ)を地下入口に設置したときの効果についても検討を加えている。

キーワード: 地下街, 都市水害, 地下浸水, 氾濫解析, 段差

¹ 正会員 京都大学防災研究所 教授

² 正会員 京都大学防災研究所 准教授

³ 学生員 京都大学大学院工学研究科 都市社会工学専攻

2. 解析モデル

(1) モデルの概要

これまでの研究において、著者らは、平面二次元モデルを基にした、非構造格子を用いた地上での氾濫モデル²⁾、およびポンドモデルを用いた地下空間の氾濫モデル³⁾をそれぞれ開発してきた。本報では、これら両モデルを結合し、さらに、降雨流出モデルを組み込むことにより、降雨による河川流出から、地上の氾濫、さらにそれによって生じる地下空間の浸水までの一連の過程を解析できるモデルを構築している。降雨による河川流出のモデルは、標準的な kinematic wave モデル⁴⁾を適用し、地上の氾濫水の地下空間への流入については、地下の入口部で段落ち流れが生じることを仮定する。

解析モデルの概念図を図-1に示す。次に、地上および地下の氾濫モデルについて簡単に説明する。

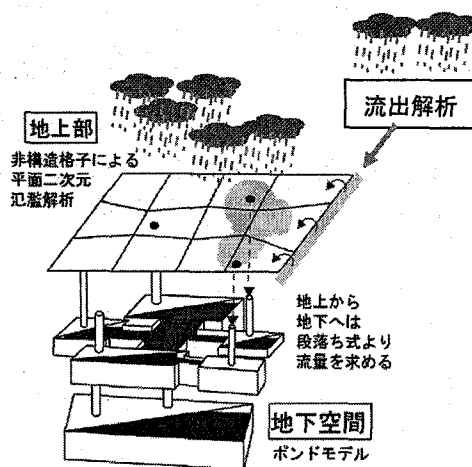


図-1 モデル概念図

(2) 地上および地下の氾濫モデル

地上の氾濫には非構造格子に基づく平面二次元氾濫モデルを適用する。格子に降る雨は、連続式の中で横流入として取り扱う。また、地上の氾濫水の下水による排除効果は、ここでは簡単に氾濫水(雨水)の横流出として取り扱う。

(地上の氾濫解析モデルの基礎式)

<連続式>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = r - r_d \quad (1)$$

<運動量式>

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial (uM)}{\partial x} + \frac{\partial (vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 M \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial (uN)}{\partial x} + \frac{\partial (vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{gn^2 N \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (3)$$

ここに、 x, y : 座標、 t : 時間、 M, N : x, y 方向の流量フラックス、 r : 有効降雨、 r_d : 下水による雨水処理量、 h : 水深、 H : 水位、 g : 重力加速度、 n : マニングの粗度係数、 u, v : x, y 方向の流速である。

一方、地下空間は、いくつかのポンド(貯留槽)が3次的に連結している場ととらえ、それらポンド間の水のやりとりを考える。

(地下空間浸水モデルの基礎式)

<連続式>

$$A \frac{dh}{dt} = \sum_{i=1}^m Q_i + Q_m \quad (4)$$

ここに、 A : ポンドの有効底面積、 h : 水深、 t : 時間、 Q_i : 貯留槽が有する i 番目の接面から流入する流量、 m : 流量の出入りが行われる接面数、 Q_m : 地上など外部からの流入流量である。

<運動量式>

$$\frac{L}{gA_b} \frac{dQ}{dt} = \Delta H - \alpha L Q |Q| \quad (5)$$

ここに、 ΔH : 水位差、 Q : ポンド間の流量、 L : 隣接する貯留槽の図心間の距離、 A_b : ポンド間の接面の断面積、 α : マニングの粗度係数に関連する損失係数である。

地上部から地下空間への接続箇所では、地下空間への流入流量を以下の段落形式で求める。

$$Q = B_e \mu h \sqrt{gh} \quad (6)$$

ただし、 B_e : 地下流入口の幅、 h : 流入地点での有効水深、 μ : 段落流れの流量係数 (=0.544) である。

3. 神戸三宮地区への適用

(1) 神戸三宮地区

上記のモデルを、生田川流域に位置する神戸市の中心市街地の三宮地区および三宮地下街に適用する。生田川流域の対象面積は、山地部、里山、都市部を含めて合計で約 22km² である。図-2 に三宮地区ならびに三宮地下街の位置を示す。三宮地区は神戸市の中心地であり、JR 線をはじめとして私鉄、地下鉄の各線の駅が集中しており、これらを結ぶようにして三宮地下街が発達している。図-3 に地表の格子とその標高を、図-4 に三宮地下街を浸水解析するのに用いたポンドとその標高を示す。地下街の面積は約 0.22km² である。神戸市は地形上、南北の勾配が大きい、三宮地下街も地上の地形の影響を受けて大きな勾配を有しており、また地下鉄ホームへの入口も地下街の勾配の影響が及ぶところに位置している。

(2) 計算条件ならびに計算ケース

氾濫を発生させる外力として、本報では、1938 年（昭和 13 年）に神戸市に大きな被害をもたらした阪神大水害時の降雨、2000 年（平成 12 年）の東海豪雨災害時の降雨、ならびに 2005 年（平成 17 年）に東京都神田川流域での洪水氾濫をもたらした短時間降雨を用いる。それぞれの降雨を与えた解析ケースを、順にケース 1、ケース 2、ケース 3 とする。ケース 1、ケース 2 は生田川の溢水による外水氾濫が支配的なケースであり、ケース 3 は内水氾濫のケースである。

図-5 に、それぞれの降雨のハイトグラフを示す。これらの降雨を対象領域に一樣に与えるとともに、下水道による雨水処理量は、簡単に、神戸市の計画処理量 49.1 mm/hr（10 年確率）の 70% に相当する量を仮定する。

三宮地下街には地下へ通じる階段が 36 箇所あり、これらが地上から地下街への氾濫水の流入口となる。これら地下街入口には止水板が用意されている。阪神大水害時の降雨を想定するケース 1、東海豪雨災害時の降雨を想定するケース 2 は、降雨継続時間が長い場合であり、高さ 50cm の止水板が地下街全域で設置されたものの、3 箇所（図-4 中の星印）で止水板がうまく機能しなかったとの想定で、これらの箇所の止水板を省いて計算を実施する。一方、東京都神田川流域での

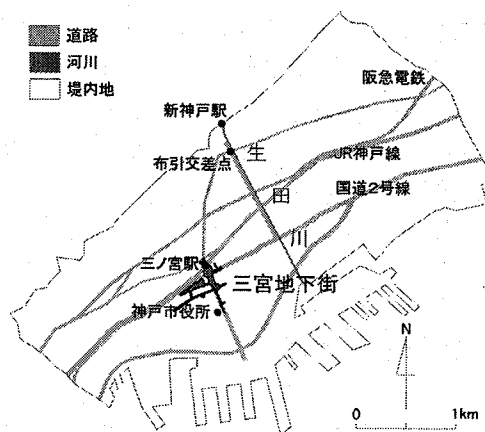


図-2 三宮地区と三宮地下街

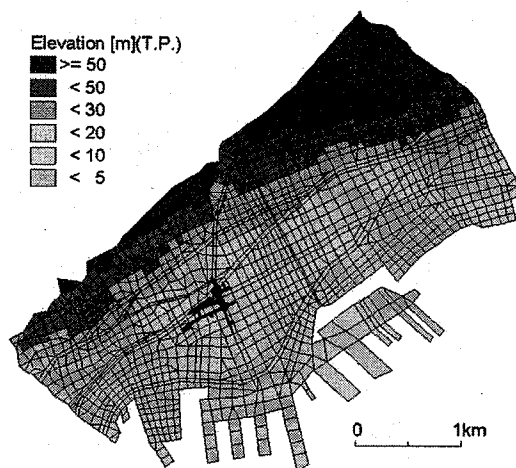


図-3 三宮地区の格子と標高

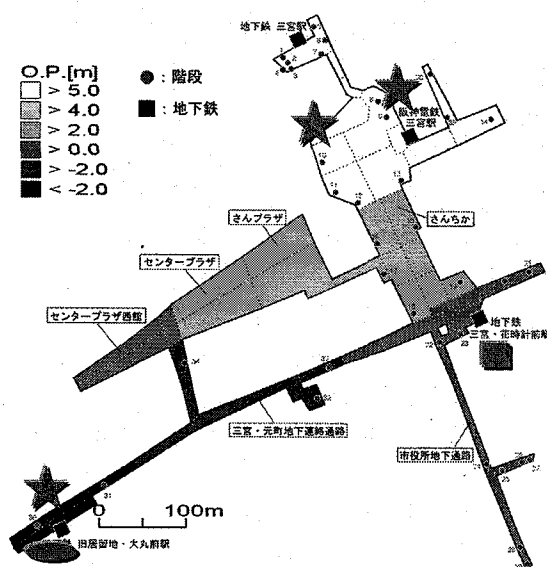


図-4 三宮地下街のポンド分割と標高

短時間降雨を想定するケース3では、雨が降り始めて直ぐに止水板を設置する時間的余裕はないと考えられるため、止水板は設置されていないとの条件で計算を実施する。地下街に流入した水は、4箇所の地下鉄ホームへの入口を通して最終的に地下鉄軌道上に排出される。排出量は(6)式で得られる。

4. 解析結果と考察

(1) 外水氾濫時（ケース1、ケース2）の解析

図-6、図-7に、ケース1、ケース2での、地下街の浸水状況がほぼピークを迎えた時刻での、地上と地下街の浸水深の分布を示す。これらの図より、地下街がピークに達する時刻においても、地上の浸水深はさほど大きいわけではないことがわかる。地下街では、ケース1で、浸水深は北側の一部の通路を除いて浸水深は20cmになっている、ケース2では、ケース1よりも浸水範囲は広がるが、浸水深は同程度である。亀井⁵⁾によれば、洪水時には平面部で、水深が成人男性で70cm以上、成人女性で50cm以上、小学校5～6年生で20cm以上になると歩行困難になるとされている。今回の外水氾濫時のケースでは、地下浸水が発生しても、避難が困難となる場所および時間は限定的である。

(2) 内水氾濫時（ケース3）の解析

図-8にケース3での、地下街の浸水状況がほぼピークを迎えた時刻での地上と地下街の浸水深の分布を示す。地上の浸水は短時間で発生し、数多くの地下街入口から水が流入する影響で、地下街では浸水深が20cmを上まわる領域がかなり現れる。これらの領域では、小学生以下の避難が困難となる。また南東端は標高の影響で氾濫水が集中し、成人でも困難な避難を強いられる。図-9に地下鉄の旧居留地・大丸前駅につながるポンド（図-4中の楕円印）、三宮・花時計前駅につながるポンド（図-4中の四角印）での浸水深の時間変化を示す（ステップなしの場合）。前者の地点では浸水深が30cmを上まわる時間帯が1時間ほど継続している。石垣ら¹⁾によると、浸水時に階段から避難するときに、上層階の水深が30cmでの流入状況が成人の避難限界となる。よってこの場合は、地下鉄ホームから地下街へ上がるのが困難な状況が現れる。

(3) 段差を設置した場合の内水氾濫時の解析（ケース3A）

短時間豪雨時には止水板を設置する時間的余裕がないことが多い。その対応策としてケース3の降雨条件で、地下街への各入口に図-10のような高さ15cmの段差（ステップ）を設置して解析を行った（ケース3A）。そのときの3時間後での地下街の浸水深の分布を図-11、地下鉄の旧居留地・大丸前駅、三宮・花時計前駅につながるポンドでの浸水深の時間変化を図-9に示す（図中のステップありの場合）。段差を設置することで地下街への流入量が減少し、浸水深も軽減している。その結果、避難の困難さもかなり緩和される。

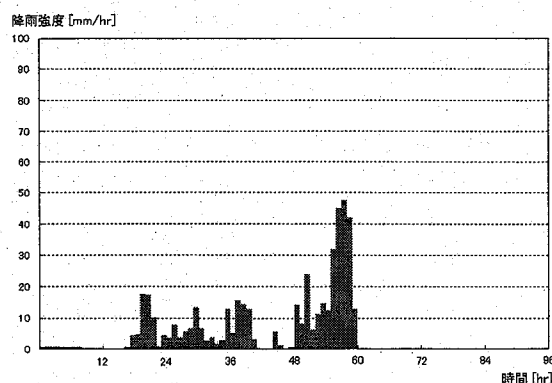


図-5(1) 阪神大洪水時の降雨

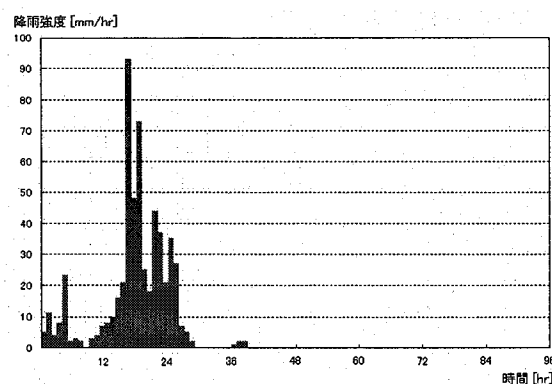


図-5(2) 東海豪雨災害時の降雨

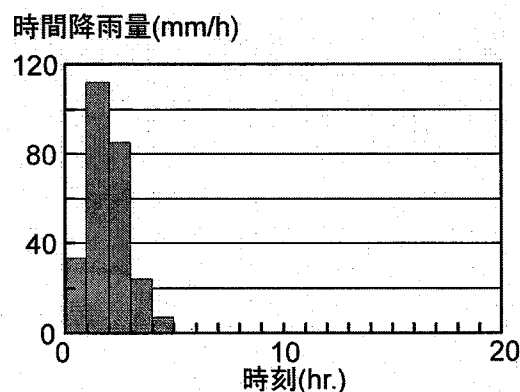
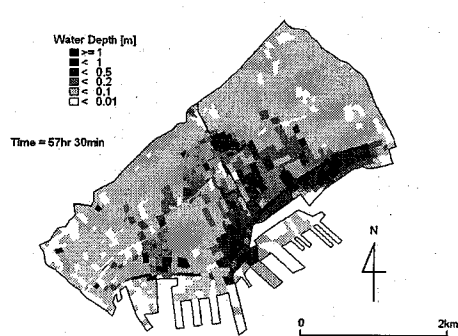
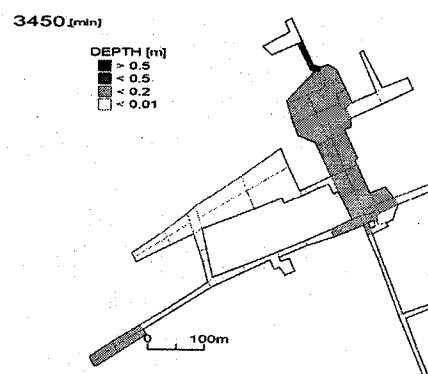


図-5(3) 神田川流域の
洪水時の降雨

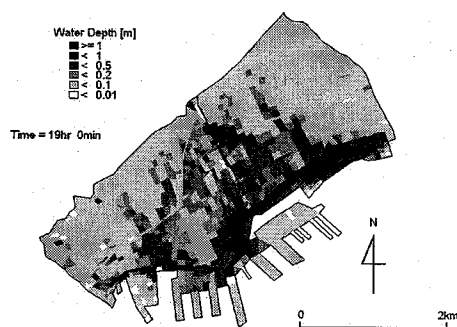


阪神大水害降雨

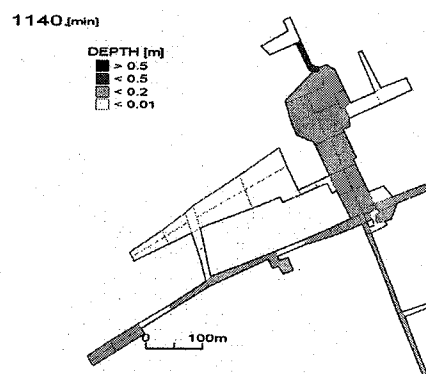


阪神大水害降雨

図-6 ケース1の地上、地下街の氾濫状況（57.5時間後）

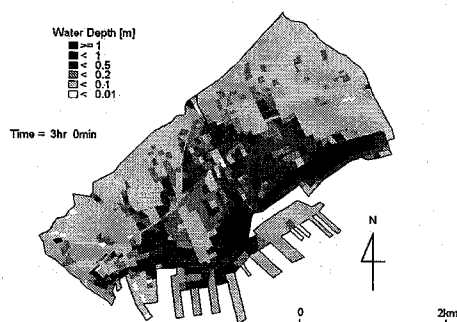


東海豪雨

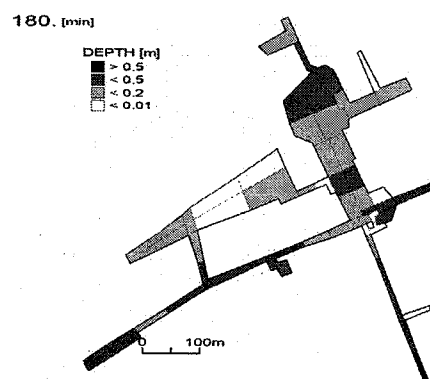


東海豪雨

図-7 ケース2の地上、地下街の氾濫状況（19時間後）



神田川流域豪雨



神田川流域豪雨

図-8 ケース3の地上、地下街の氾濫状況（3時間後）

5. おわりに

本報の主要な結果は以下のとおりである。

- ・降雨およびその流出から地上の氾濫と地下空間の浸水までの一連の過程を解析できるモデルを構築した。このモデルは地下浸水の予測を行い、その対策を考えるにあたり、有効な手法になると考えられる。
- ・このモデルを神戸市生田川流域に位置する三宮地区ならびに三宮地下街に適用した。その結果、止水板を設置する時間的余裕がないような短時間豪雨に対しては、三宮地下街でも地下浸水で危険な状況が発生する

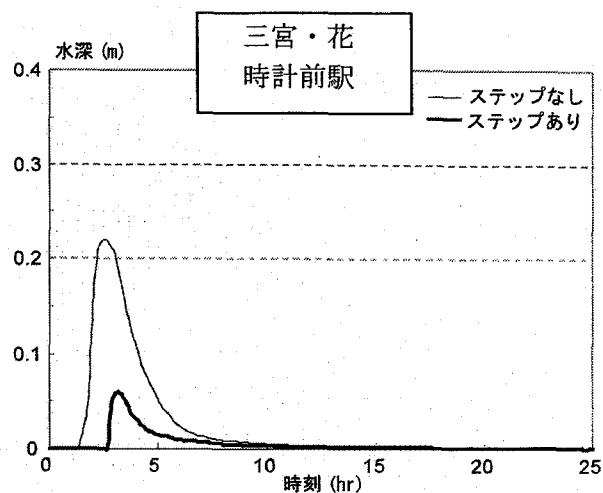
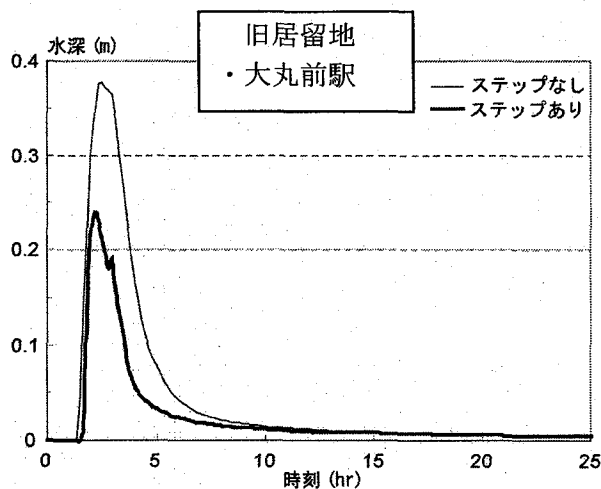


図-9 地下街2地点での浸水深の時間変化 (ケース3, ケース3A)

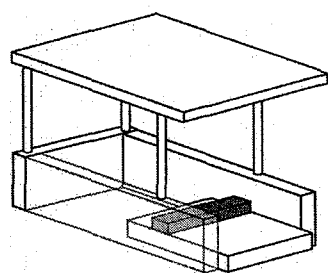
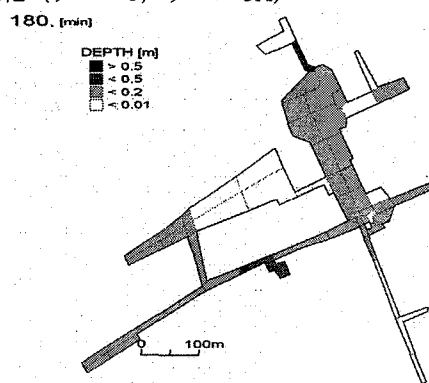


図-10 入口の段差 (ステップ)



神田川流域豪雨

図-11 ケース3A(段差あり)の地下街の氾濫状況 (3時間後)

可能性があることが明らかとなった。

・今回のモデルの適用により、内水氾濫時の地下浸水に対しては、段差 (ステップ) を設置すれば地下への浸水量が軽減し、危機回避につながるということが再確認された。

謝辞：本研究を進めるにあたり、協力いただいた京都大学大学院生(当時)の荒木孝夫氏、川本宗由氏、中村有克氏に謝意を表する。また本研究の一部は H18～19 年度国土交通省の建設技術研究開発助成制度の助成を受けて実施したものである。

参考文献

- 1) 石垣泰輔・馬場康之・戸田圭一・島田広昭：地下空間浸水時の避難困難度について，地下空間シンポジウム論文・報告集，第12巻，pp.147-152, 2007.
- 2) 川池健司・井上和也・戸田圭一：非構造格子の都市氾濫解析への適用，水工学論文集第44巻，pp.461-466, 2000.
- 3) 戸田圭一・栗山健作・大八木亮・井上和也：複雑な地下空間における浸水解析，水工学論文集第47巻，pp.877-882, 2003.
- 4) 近森秀高：kinematic wave による流出計算 (1)特性曲線法，水理公式集例題プログラム集平成13年度版，土木学会，2001.
- 5) 亀井勇：台風に対して，天災人災住まいの文化誌，ミサワホーム総合研究所，1984.