

水害危険情報のわかりやすい提示を目的とした 浸水シミュレータの開発

DEVELOPMENT OF A FLOOD SIMULATOR
FOR A FLOOD RISK COMMUNICATION TOOL

山口 悟史¹・室 啓朗²・岩村 一昭²

Satoshi YAMAGUCHI, Keiro MURO and Kazuaki IWAMURA

¹正会員 理修 株式会社日立製作所 中央研究所 (〒185-8601 国分寺市東恋ヶ窪1-280)

²非会員 工修 株式会社日立製作所 中央研究所 (同上)

In this paper, we present a new type flood simulator for flood risk communication. The characteristics of presented simulator are: (1) Calculation speed of flood flow is very fast; (2) It offers a fully interactive user interface; (3) It provides the property damage assessment based on the simulated results; (4) It visualizes the simulated results with three-dimensional cityscapes. The shallow water equations are solved by using a combination of leapfrog scheme and staggered grid to accelerate the flood flow calculation. Meanwhile we develop an execution sequences controlling function that enable parallel processing the visualization of current state of simulated flow as well as the simulation, and it underlies the interactive user interface. Moreover in order to implement these characteristics, we apply four-dimensional Geographic Information System (4D-GIS), which is suitable to manage and to simulate flood events with 3D geographic data and the simulated time sequence. Through an experiment, presented simulator shows a very promising performance, which would significantly improve the flood damage understanding of society.

Key Words: *fast flood simulation, four-dimensional geographic information system, shallow water equations*

1. はじめに

自治体が水害の危険情報を住民に周知させることが、近年求められている。水害時の避難地および避難経路と、想定される浸水深などを記載した洪水ハザードマップの配布は、水害危険情報の周知のための有効な手段とされており、洪水ハザードマップの配布を行う自治体が急増している。さらに近年、水害の危険情報の提示を目的としたシステムの研究がなされている。横塚¹⁾は氾濫シミュレーションを高速に行い、計算結果を地図上に表示するシステムを開発した。また、安田ら²⁾は、高速に浸水領域を予測する手法を開発し、さらにその結果をGIS (Geographic Information System)で利用するシステムを開発した。

一方で、水害の非専門家である住民に対し、わかりやすく水害危険情報を提示する必要性が認識されている。たとえば、国土交通省³⁾は、生活実感が伴う水害危険情報の表現に関する検討を行っている。水害危険情報をわかりやすく提示できるシステムがあれば、住民にとって有益であると考えられる。

本研究は、水害危険情報をわかりやすく提示するシステムを提案する。まず、本研究で提案する「浸水シミュレータ」のコンセプトを説明する。次に、システム構成と機能の実装について述べる。続いて、浸水シミュレータが提示する情報のわかりやすさを検証し、最後に、わかりやすい情報の提示方法について考察する。

2. 浸水シミュレータのコンセプト

(1) 浸水シミュレータの要件

浸水シミュレータは、水害危険情報のわかりやすい提示を目的としたシステムである。水害危険情報をわかりやすく提示するシステムは、以下の4つの要件を満足することが必要であることを提案する。

要件1：浸水現象の過程の提示

浸水結果だけではなく、結果に至る時々刻々の浸水過程を提示すること。たとえば、破堤後に浸水範囲が広がっていく様子を提示すること。

要件2：多様な浸水開始条件の設定

利用者の操作に応じて、浸水の開始原因となる条件を設定すること。たとえば、利用者の指定した位置とタイ

ミングで破堤が発生するように設定すること。

要件3: 被害情報の提示

水深など流れに関する物理量だけでなく、被害に関する情報を提示すること。たとえば、床上浸水した家屋数を提示すること。

要件4: 都市景観をベースとした表示

浸水状態を地形、家屋などの地物と重畠させてビジュアル(視覚的)に表現すること。

(2) 要件を実現する機能

要件1および2は、以下の機能1および2の組み合わせにより実現できる。また、要件3および4は、それぞれ機能3および4により実現できる。

機能1: 高速な氾濫流シミュレーション機能

時間ステップ幅を大きくとれる安定な差分化手法の採用により、氾濫流シミュレーションを高速に行う機能。

機能2: 対話型シミュレーション機能

シミュレーション実行中であってもシミュレーション条件の変更が行える機能。また、シミュレーション実行中に途中結果が表示され、かつ利用者の操作を受け付ける機能。

機能3: 家屋浸水解析機能

氾濫流シミュレーションの結果を詳細に解析し、家屋ごとに床上・床下浸水を解析する機能。

機能4: 3次元アニメーション表示機能

地形や家屋などとともに浸水面を3次元表示し、その時間変化をアニメーション表示する機能。

3. システム構成と機能の実装

(1) システム構成

本研究では、著者らが従来から開発を行ってきた地理情報システム「4D-GIS」^{4,5)}(付録参照)を用いて、浸水シミュレータを実装した(図-1)。4D-GISとは、平面に展開された2次元の空間情報のみならず、立体や時間変化する実世界に対応した4次元の空間情報を利用するために開発されたGISである。4D-GISを用いることで、3次元空間情報を用いたシミュレーションの実行機能、結果の時系列管理機能、結果の可視化機能を効率的に実装することができる。

4D-GISは、GUI(Graphical User Interface), GISエンジンと4D-GIS API(Application Program Interface)とから構成される。また、浸水シミュレータはシミュレータとシミュレータハンドラ、解析アルゴリズムと解析ハンドラ、およびデータハンドラから構成される。シミュレータは、氾濫流シミュレータなど、微分方程式を時間積分し時々刻々の変化を計算する機能である。シミュレータハンドラはシミュレータを制御する機能である。解析アルゴリズムは家屋の浸水解析など、時間積分を伴わない空間解析を行う機能である。解析ハンドラは解析アルゴリズムを制御する機能である。データハンドラはファイルやデータベースと4D-GISとの間でデータの受け渡しを行う機能である。それぞれのハンドラは4D-GIS APIを通じて4D-GISのGISエンジン、GUIと連携する。

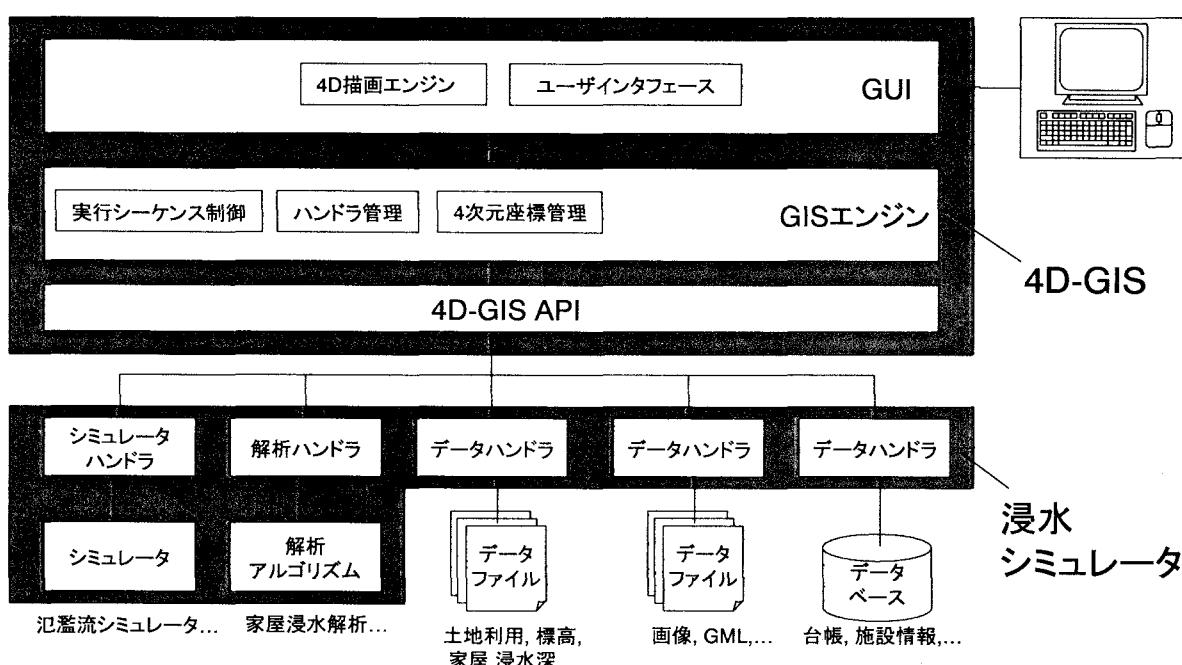


図-1 浸水シミュレータのシステム構成

(2) 機能の実装

a) 機能1：高速な氾濫流シミュレーション機能

氾濫流シミュレーション機能を4D-GISのシミュレータとシミュレータハンドラとして実装した。また、結果の浸水深時系列を4D-GISで管理するため、浸水深データハンドラを実装した。氾濫流シミュレータハンドラは一定の時間ステップごとにシミュレーション結果を浸水深データハンドラに出力する。

詳細な地形、土地利用表現に基づく詳細な氾濫流を再現するために、計算格子の大きさが家屋のスケール(10m程度)となる場合の氾濫流をモデル化する。福岡ら⁶⁾の研究から、この計算格子の大きさでは、氾濫流は2次元不定流によりモデル化することが適当であると考えられる。高速化のために、計算負荷が小さく安定性の高いリープフロッギング法とスタッガードグリッドの組み合わせにより差分化し、CFL(Courant-Friedrichs-Levy)条件から設定可能な時間ステップを見積もった。

2次元不定流方程式を式(1)から(3)に示す。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2}{h^{1/2}} M \sqrt{u^2 + v^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{gn^2}{h^{1/2}} N \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3)$$

ここで、 h :水深、 H :水位、 u , v :それぞれ x , y 方向の流速、 M , N :それぞれ x , y 方向の流量フラックス、 g :重力加速度、 n :マニニングの粗度である。この式をリープフロッギング法、スタッガードグリッドの直交格子により差分化した式を(4)から(6)に示す。

$$h_{i,j}^{n+1} = h_{i,j}^n - \Delta t \left(\frac{M_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} - M_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} + \frac{N_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - N_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} \right) \quad (4)$$

$$M_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{1 + a_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}}} ((1 - a_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}}) M_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \left(\frac{(uM)_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} - (uM)_{i-\frac{1}{2},j}^n}{\Delta x} + \frac{(vM)_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} - (vM)_{i-\frac{1}{2},j}^n}{\Delta y} \right)) \quad (5)$$

$$N_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{1 + a_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}} ((1 - a_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}) N_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \left(\frac{(uN)_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - (uN)_{i,j-\frac{1}{2}}^n}{\Delta x} + \frac{(vN)_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - (vN)_{i-1,j-\frac{1}{2}}^n}{\Delta y} \right)) \quad (6)$$

$$+ g \frac{h_{i,j}^n + h_{i,j-1}^n}{2} \frac{H_{i,j}^n - H_{i,j-1}^n}{\Delta x})$$

$$a_{i,j}^n = \frac{\Delta t}{2} g n_{i,j}^2 \frac{\sqrt{u_{i,j}^n + v_{i,j}^n}}{\left(h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}\right)^{1/2}} \quad (7)$$

である。水深 h と流量フラックス M , N がリープフロッギング法により1/2時間ステップ、スタッガードグリッドにより1/2格子ずれて配置される。ここで、移流項(2)式お

より(3)式の左辺第2および第3項は1次精度風上差分法を用いた。また、摩擦項((2)および(3)式の右辺第2項)は以下のように時間方向に平均化した(x 方向のみ示す)。

$$\begin{aligned} \frac{gn^2}{h^{1/2}} M \sqrt{u^2 + v^2} &= \frac{gn_{i,j}^2}{\left(h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}\right)^{1/2}} \frac{M_{i,j}^{n-1} + M_{i,j}^n}{2} \sqrt{u_{i,j}^{n-1} + v_{i,j}^{n-1}} \\ &= \frac{a_{i,j}^{n-1}}{\Delta t} (M_{i,j}^{n-1} + M_{i,j}^n) \end{aligned} \quad (8)$$

計算誤差による過大な流速の発生を防ぐため、 $h<0.001$ [m] が成り立つ格子において、 $M=N=0$ とした。また、斜面で水流が不連続になる格子では段落ち流れとした。マニニングの粗度は、福岡ら⁶⁾の値を参考にして、土地利用ごとに設定した。

高速化のためには、時間ステップを拡大することが効果的である。ただし、時間ステップを制約なしに拡大すると、数値計算上不安定になる。このため数値安定性に関する必要条件の一つであるCFL条件に基づいて時間ステップの上限を見積もった。CFL条件より、時間ステップ Δt は

$$\Delta t \leq \Delta t_{\max} = \frac{1}{C_{\max}} \frac{\Delta x \Delta y}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}} \quad (9)$$

を満たす必要がある。ここで C_{\max} はすべての格子、すべての時間ステップにおける $C=2(gh)^{1/2}+u$ の最大値である。ここで、 h の最大値を $h=1.0$ m, u の最大値を $u=2.0$ m/sと想定して C_{\max} を見積もると $C_{\max}=8.2$ m/s である。この C_{\max} に対応する Δt_{\max} を Δt の上限値とした。実際のシミュレーションでは、4章で説明する実験環境で Δt の設定を変化させてシミュレーションを行い、安定してシミュレーションが実行できる Δt の値を採用した。その値は $\Delta t/\Delta t_{\max}=0.96$ であり、CFL条件を満たしていた。

降雨の効果を表現する場合は、降水量に応じた水量を水深 h に加えた。土地利用が田畠などの場合には、10mm/hrの浸透を仮定した。また、初期損失は無視し、浸透しない雨水はすべて流出するとした。

下水の雨水排水効果を表現する場合は、下水の代表的な排水設備として雨水ますを考慮し、水深 h から雨水ますの設備の排水能力に応じた水量を差し引いた。雨水ますの排水能力はMostkow式により見積もった。

$$q = -\mu s \sqrt{2gh} \quad (10)$$

ただし、 q : 排水量、 μ : 流量係数、 s : 排水口面積である。ここで、 $\mu=0.8$ とした。

b) 機能2：対話型シミュレーション機能

対話型シミュレーションを行うために、シミュレーションの実行シーケンス制御機能を実装した。図-2を用いて実行シーケンス制御機能を説明する。まず、利用者がシミュレーション開始の操作を行うと、4D-GISが有するGUIが実行シーケンス制御機能を起動する。実行シーケンス制御機能は、氾濫流シミュレータハンドラに氾濫流シミュレーションを n_A 時間ステップ行わせ、続いてそ

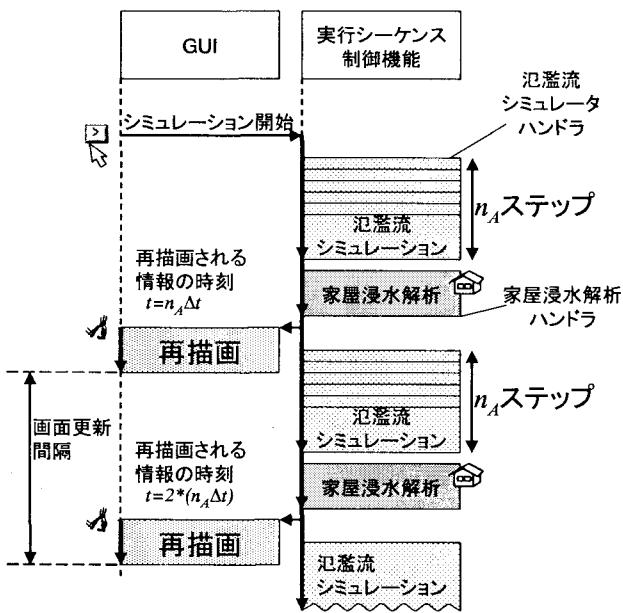


図-2 実行シーケンス制御機能による制御

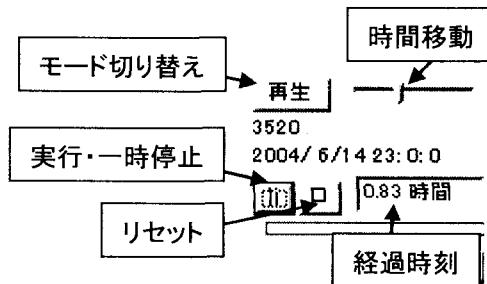


図-3 シミュレーションの操作パネル

の計算結果を家屋浸水解析ハンドラに解析させる。それらが終了すると画面の再描画をGUIに依頼する。これらの一連の流れを利用者がシミュレーション停止の操作を行うまで繰り返す。画面には時間 $n_A \Delta t$ ごとの情報が提示される。なお、 n_A が大きいと画面更新間隔は長くなるため、 n_A が大きすぎる場合にはなめらかに変化しているように見えない。そのため、 n_A の値を適切に調整するためのユーザインターフェースを用意した。本研究の環境では $n_A=100$ ステップが適していた。

図-2において、GUIおよび実行シーケンス制御機能はそれぞれ独立したスレッド(処理単位)になっている。したがって、シミュレーション実行処理およびユーザインターフェースの処理を平行して同時に進行することができる。利用者はシミュレーション実行中においても操作結果を画面で確認することができ、シミュレーション条件変更などの操作を対話的に行うことができる。

c) 機能3: 家屋浸水解析機能

家屋の浸水を解析する家屋浸水解析アルゴリズムとその解析ハンドラを実装した。さらに、家屋1軒ごとの位置、形状、床高、被害状況のデータを扱う家屋データハ

ンドラを用意した。家屋浸水解析ハンドラの処理手順を説明する。まず、家屋データハンドラから家屋の位置と床高を、浸水データハンドラから浸水深を取得する。次に家屋浸水解析アルゴリズムを用いて家屋の床高と浸水深とを比較し、床上・床下浸水のどちらかを推定する。ここで、床下浸水となる浸水深は10cm以上床高以下、床上浸水となる浸水深は床高を超える浸水深とした。最後に、被害解析結果を家屋データハンドラに渡し、家屋データハンドラにその家屋データの被害状況の項目を更新させる。

d) 機能4: 3次元アニメーション表示機能

任意の時刻におけるシミュレーション結果を都市景観と重ね合わせ3次元表示するために、4D-GISが有する表示機能(4D描画エンジン)を用いた。4D描画エンジンは各種のデータを3Dアニメーション表示することができる。

図-3にシミュレーションの操作パネルを示した。このパネルは、パネル上部のモード切り替えボタンにより解析モードと再生モードを切り替える。利用者は操作パネルを通じて、解析を行いながらその結果を表示する「解析モード」時には、シミュレーション開始または停止の指示をする。また、事前に行った解析結果を表示する「再生モード」時には、結果のアニメーション表示の再生、一時停止、リセットなどの指示をする。操作パネルにより、シミュレーションの実行と再生の操作を統一し、利用者が直感的に操作できるようにした。

4. 結果

4章では、実データを用いて浸水シミュレータの実験環境を試作した。また、試作した実験環境を用いて、浸水シミュレータのわかりやすさについて検証した。

(1) 実験環境に用いたデータ

実験環境では、雨水による内水氾濫の解析を行う。平均勾配約4.6/1000、最大勾配約8.5/1000の1km四方の領域について、標高、土地利用、道路、街区、家屋形状、家屋の床高の各データと、航空写真、現地のスナップ写真の画像を用意した。ただし土地利用、家屋形状は航空写真から読み取り、すべての家屋の床高を地盤高から0.5mとした。

格子数は東西66×南北66、格子の大きさは $\Delta x=17.1\text{ m} \times \Delta y=13.6\text{ m}$ 、 $\Delta t=1.25\text{ sec}$ とした。降水量として全ての格子に1時間連続して140mm/hrを与えた。下水の効果を考慮するため、道路両側10mおきに矩形0.1m²の雨水ますがあると仮定した。

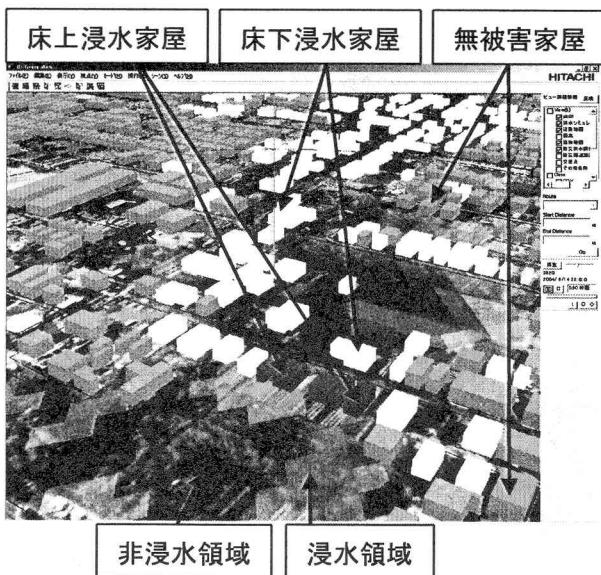


図-4 広域表示画面



図-5 拡大表示画面

(2) 実行結果

実時間で1時間に相当するシミュレーションを、PC (CPU周波数: 3.0 GHz) を用いて約10 secで完了した。シミュレーション実行中は、途中結果を約0.7 secごとに表示した。途中結果を表示させない設定にすると、約7 secで終了した。

図-4および図-5にシミュレーション実行中に表示される画面例を示す。図-4は約100m四方の表示である。地表面に航空写真が貼られ、3次元で地形、家屋が表示されている。浸水領域では浸水深に応じた色で水面を表示させた。また、家屋ごとの浸水解析結果である床上浸水、床下浸水家屋、被害なしの3状態を表すため、状態に応じて家屋の表示色を変化させた。図-4から、数軒の家屋が床上浸水していることがわかる。これらの家屋の周辺は窪地となっているため、雨水が貯留しやすいと考えられる。

表-1 評価項目

評価項目	内容
#1	自宅の被害状況が具体的に想像できた
#2	自宅周辺の被害状況が具体的に想像できた

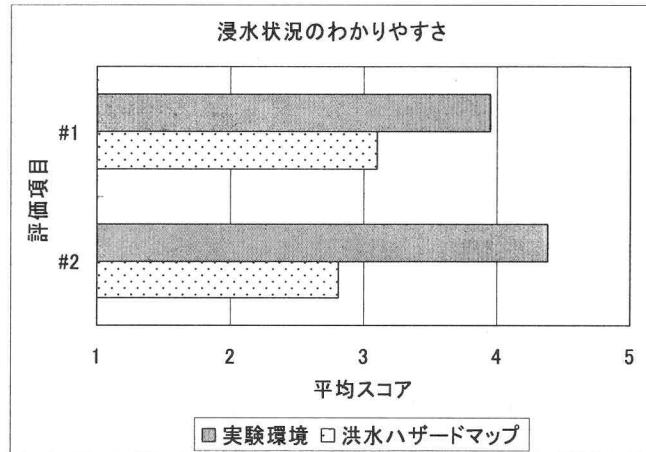


図-6 洪水被害のわかりやすさ

図-5は拡大表示である。家屋の側面には現地で撮影したスナップ写真が表示されている。図-4においてある家屋をクリックすると、画面の視点がクリックした家屋に徐々に近づき段階的に図-5の表示に切り替わる。

(3) 検証

浸水シミュレータの提示する情報のわかりやすさについて検証した。検証方法は、水害の非専門家からなる被験者に洪水ハザードマップおよび実験環境を見せ、表-1に記載した2つの評価項目について、「強くそう思う(スコア5)」「そう思う(スコア4)」「どちらともいえない(スコア3)」「そうは思えない(スコア2)」「全くそう思わない(スコア1)」の5段階のスコアで評価させる方法である。評価項目#1により屋内の被害状況のわかりやすさを、また評価項目#2により屋外の被害状況のわかりやすさを検証する。検証は被験者3人ずつのグループごとに、計21名について行った。洪水ハザードマップおよび実験環境について、凡例などの説明を含め、約10分ずつかけて評価した。

洪水ハザードマップとして、自治体から実際に配布されている、想定浸水深が0.5m未満、0.5m以上1m未満、1m以上2m未満、2m以上の4段階で色分けされた15,000分の1の地図を提示した。一方、実験環境として、図-4、図-5に示した表示を含む、都市景観と浸水面を重畠した3Dアニメーションを提示した。図-6に洪水ハザードマップと実験環境における評価項目の平均スコアを示す。

5. 考察

検証の結果より、以下のことが示唆される。

- (1) すべての評価項目において、実験環境のスコアが洪水ハザードマップのスコアを上回った(図-6)。このことから、浸水シミュレータが提示する情報は、被害把握に効果的であることが示唆される。
- (2) 実験環境のスコアと洪水ハザードマップのスコアの差は評価項目#1よりも評価項目#2の方が大きかった。このことから、家屋単位で浸水被害を評価した情報の提示は、屋外の被害把握により効果的であることが示唆される。
- (3) 被害状況をビジュアルに提示することが、被害把握に効果的であると考えることができる。したがって、屋内の状態をビジュアルに提示し、家屋よりも詳細な単位、たとえば家財単位で浸水被害の評価を行えば、屋内の被害把握により効果的であると考えられる。また、避難所、避難経路などをビジュアルに提示すれば、避難方法の把握に効果的であると考えられる。

6. 結論

本研究では、水害危険情報をわかりやすく提示することを目的としたシステム(浸水シミュレータ)を開発し、浸水シミュレータが提示する情報のわかりやすさを検証した。

浸水シミュレータは、以下の4つの機能を持つ。

- (1) リープロッギング法とスタッガードグリッドによる高速な氾濫流シミュレーション機能
- (2) シミュレーションの実行シーケンスを制御することによる対話型シミュレーション機能
- (3) 家屋ごとに床高と浸水深を比較することによる家屋浸水解析機能
- (4) 浸水面を地形や家屋などと重畠することによる3次元アニメーション表示機能

浸水シミュレータが提示する情報のわかりやすさを被験者の評価により検証した。その結果、浸水シミュレータが提示する情報は、被害状況の把握に効果を発揮することが示唆された。

今後の課題は、表示およびユーザインタフェースの改良である。浸水シミュレータが、災害危険情報をわかりやすく提示する手段として実際に適用されることを目指す。また、氾濫流計算の精度検証が必要である。シミュレーション結果を過去の水害事例を用いて検証し、シミュレーションの信頼性を高める。

付録 4D-GISについて

4D-GISとは、著者らが独自に開発した、点、線、面、立体、およびそれらの時系列を含んだ地理情報(4次元地理情報)を扱うためのシステムである。4D-GISの特徴は、(1) 表現次元の拡張: 図面、図形、構成点の複数のレベルで時間情報を格納し、変化差分で管理することにより、時系列データをコンパクトに管理すること、(2) データ統合: 空間データを位置と時間という4次元座標で統合管理することにより、様々なデータ構造の重畠・検索を可能とすること、である。

4D-GISの実装について述べる。4D-GISは4次元地理情報を「ハンドラ」を通じて管理する。ハンドラは4D-GISと4D-GIS API (Application Program Interface)を通じて連携し、地理情報が格納されたデータファイル、データベースの入出力を行う。さらに、解析アルゴリズム、シミュレータ、外部プログラムについても、ハンドラを作成することができ、4D-GISはそれらを統合的に管理する。

4D-GISは通常のPCで動かすことを前提とした、C++で記述されたウィンドウアプリケーションである。4D-GISは実行ファイル(exe)形式として実装される。またハンドラはDLL (Dynamic Link Library) 形式で実装される。4D-GISはハンドラを起動時に組み込むプラグイン方式を採用しているため、4D-GISを変更せずにハンドラの追加・削除が行える。開発者は、シミュレータ機能や解析機能に対応したハンドラをDLL形式で作成することにより、4D-GISにそれらの機能を追加できる。

参考文献

- 1) 横塚尚志: 動く洪水ハザードマップについて, 平成15年度河川情報シンポジウム講演集, pp.5-1 - 5-11, 2003.
- 2) 安田浩保、白土正美、後藤智明、山田正: 水防活動の支援を目的とした高速演算が可能な浸水域予測モデルの開発, 土木学会論文集, No. 740/II-64, 1-17, 2003.
- 3) わかりやすい洪水・渇水の表現検討会、的確な理解に繋がる洪水・渇水の情報提供について(提言案), 国土交通省河川局ホームページ, 2004.
- 4) 電気学会・空間情報統合化調査専門委員会 編: GISの基礎と応用-空間情報の統合化技術-, 第18章 4次元地理情報処理システム, オーム社, 2001.
- 5) 岩村一昭、野本安栄: 4次元GISを用いた実世界情報管理、地理情報システム学会, 第5回オブジェクト指向GISワークショップ, pp.33-39, 2000.
- 6) 福岡捷二、川島幹雄、松永宣夫、前内永敏: 密集市街地の氾濫流に関する研究, 土木学会論文集, No. 491/II-27, pp.51-60, 1994.

(2004. 9. 30 受付)