【研究・技術ノート】

GIS を用いた洪水氾濫時避難行動解析システムの開発

明田 修・天野貴文・内田裕丈

Development of the GIS-based evacuation action analysis system against flood disasters

Osamu AKETA, Takafumi AMANO and Hirotake UCHIDA

Abstract: In this study, the analysis system of evacuation action at the time of flood was developed using GIS. The system applied the network analysis which considers multiple refugees and shelters simultaneously and searches the shortest paths through the network links from halfway of the links. Moreover, the evacuation action was simulated in detail by linking network analysis and flood analysis. As a result, it was shown that the analysis system is applicable to plan suitable evacuation routes and shelters, and enlighten the residents on the importance of early evacuation.

Keywords: 避難行動 (evacuation action), ネットワーク解析 (network analysis), 洪水氾濫解析 (flood analysis), 歩行速度 (walking speed)

1. はじめに

近年, 日本各地は集中豪雨による洪水氾濫が多発傾向にある. とくに, 平成 16 年 7 月の新潟・福島豪雨から 10 月の台風 23 号までの立て続けの洪水氾濫は, 早急な洪水防災対策の重要性を改めて認識させられた.

水害, とくに洪水氾濫被害の緩和のためには, 堤防などの治水施設の整備によるハード対策の推進を第一義的に考えつつも, 一方で, 堤防は施設能力を超える洪水により破堤に至る危険性を内在していることから, 災害情報の伝達体制や避難誘導體制の充実, 住民の防災意識の高揚などによるソフト面での対策をおこなうことも重要であると考えられている (国土交通省河川局治水課, 2005).

本研究では, 洪水氾濫時の避難者の避難行動をシ

ミュレートし, 水害に対するソフト面の対策である

1) 行政による避難計画の策定, 2) 住民の防災意識の啓発, での利用を目的として, GIS (Geographic Information System) を用いた洪水氾濫時避難行動解析システムの構築を試みている.

2. 避難行動解析システムの開発

2.1. システム開発環境

今回構築するシステムはネットワーク解析およびネットワークとメッシュ間のオーバーレイ解析を多用する. そこで, システム開発では GIS エンジンとしてネットワーク解析およびジオメトリ間の演算機能が充実した SuperMap Objects 2003 を採用した. なお, 開発言語は Visual Basic を用いている.

2.2. システムの主な機能

本システムの機能は次の 2 点に集約される.

1) 避難者の避難行動のシミュレーション機能

GIS のネットワーク解析機能により, 避難者にとって最短または最適な避難所までの避難路を抽出

明田: 〒533-0033 大阪市東淀川区東中島 3-5-9
株式会社 総合技術コンサルタント 大阪支社
TEL: 06-6325-2923 FAX: 06-6324-3794
天野: 合同会社 テラ・サイエンス
内田: 株式会社 総合技術コンサルタント 大阪支社

する機能、並びに避難者の移動を逐次追跡し、時系列で位置データを取得する機能。

2) 洪水氾濫解析結果とのリンク機能

1) の機能は洪水氾濫解析とリンクすることができ、両者によりリアルタイムの避難行動解析を実現する機能。

2.3. 避難行動アルゴリズム

2.3.1. 避難者の基本行動と各種条件

(1) 避難者の基本行動

避難者は避難の開始後、以下の基本行動をとるものと仮定する。

- ・避難者は指定の避難所へ徒歩で向かう。
- ・目標とする避難所までの経路が浸水し、避難が困難になると、現在地から最近隣にある利用可能な避難所に目標を変更する。

(2) 歩行割引率

シミュレーションはリアルタイム性を考慮し、避難者の歩行速度の計算の際には以下の割引を考慮する。

- ・避難者は時間の経過に伴い、疲労により歩行速度が低下する。
- ・避難路の浸水深に比例して、避難者の歩行速度が低下する。
- ・同一路線に避難者が集中すると、混雑のために避難者の歩行速度が低下する（群集流動による歩行速度の低下を考慮する）。

(3) 避難成功の条件

避難成功の条件を以下のとおり定義する。

- ・避難所への経路の全てが一定の浸水深（0.7m）を超える前に避難所に到着する。

(4) 避難失敗の条件

避難失敗の条件を以下のとおり定義する。

- ・避難成功前に避難所への経路の全てが一定の浸水深（0.7m）を超える。
- ・歩行速度の割引の結果、歩行速度が0m/sになる。

2.3.2. 歩行割引率

避難者の歩行速度に影響を及ぼす要因には環境条件や肉体的条件など、さまざまなものが存在するが、

本研究では西原の研究（西原，1983）をベースに疲労、群集流動、浸水深による歩行速度の低下を GIS 向けに適用し、以下のとおり定義した。

$$V_n^t = T^t \cdot W_n^t \cdot U_n^t \quad (2.1)$$

ここで、 V_n^t ：時刻 t における経路 n 上の歩行速度（m/s）、 T^t ：避難開始から t 時間経過時の疲労による歩行割引率、 W_n^t ：経路 n 上の浸水深による歩行割引率、 U_n^t ：経路 n 上の群集流動による割引後の歩行速度（m/s）、を示す。

(1) 疲労による割引

歩行開始から t 時間経過したときの疲労による歩行速度の割引率は以下のとおりとする。

$$T^t = \frac{1.0}{0.982 + \exp(1.12t - 4.0)} \quad (2.2)$$

(2) 浸水深による割引

過去の事例より、避難路の冠水深が0.7m 以上は通行不可能として浸水深による歩行速度の割引率を次式の通り設定する。

$$W_n^t = -\frac{1}{0.7} d_n^t + 1 \quad (2.3)$$

ここで、 d_n^t ：時刻 t から $t + \Delta t$ における避難路 n 上の最大浸水深（m）、である。

(3) 群集流動による割引

群集流動は中川らの研究（中川ほか，1997）になり、以下のとおり設定する。

$$U_n^t = \begin{cases} \bar{U}_0 - C\rho_n^t & (\rho_n^t < \rho_{\max}) \\ \bar{U}_{\min} & (\rho_n^t > \rho_{\max}) \end{cases} \quad (2.4)$$

$$C = \frac{\bar{U}_0 - \bar{U}_{\min}}{\rho_{\max}} \quad \rho_n^t = \frac{M_n^t}{B_n L_n}$$

ここで、 $\bar{U}_0$ ：初期歩行速度（全ての避難者は、1) 大人：1.42m/s、2) 子供連れ：1.02m/s、3) 高齢者単独：0.948m/s、4) 高齢者を含むグループ：0.751m/s、のいずれかに当てはまる）、 $\bar{U}_{\min}$ ：最遅歩行速度（0.49m/s と定義）、 C ：歩行速度の低下の割合を示す係数、 ρ_n^t ：群集密度（人/m²）、 B_n ：経路 n の幅員（m）、 L_n ：経路 n の延長（m）、 M_n^t ：経路 n 上の群集人数（人）、 $\rho_{\max}$ ：許容最大群集密度（3.85 人/m² と定義）、とする。

2.4. リアルタイム最適経路解析

避難経路解析はGISが持つネットワーク解析機能を用いる。ここでは、西原の研究（西原，1983）に基づき、浸水深による割引を考慮した仮想路線長を用いて最短経路を解析した。なおネットワーク解析部は中川らの方法（中川ほか，1997）を改良して用いている。本解析は避難者グループ、避難所の双方とも複数の設定による多対多の解析が可能となっている。

本システムは実際の洪水氾濫時の避難者の避難行動を把握するため、リアルタイム最適ルート解析と時々刻々の氾濫解析結果をリンクさせることにより、より細かく避難者の状況をシミュレートしている。具体的な方法は図-1のネットワークを例とすると、次のとおり示される。フロー図は図-2に示す。

- 1) 避難開始点から最近隣のノード N_s を起点とする。
- 2) 氾濫解析をおこない、浸水深を対象領域のメッシュに設定する。対象領域内の全てのリンクは交差する単独または複数のメッシュから最大の浸水深を読み込み、水深が0.7mを超える場合は通行不可能にする。
- 3) 目標とする避難所までの経路を求める。
- 4) 目標とする避難所がない、または目標とする避難所までの経路が存在しない場合、任意のノード N_i （開始直後は N_s ）から任意の避難所ノード N_j までの最短経路を F_{ij} とし、 N_i から全ての避難所ノードまでの最短距離を求める。距離計算は各リンクの延長に対し、浸水深による通行の困難さを考慮した次式の換算値を用いて計算する。経路がない場合は避難失敗となる。

$$L'_n = L_n / W_n^t \quad (2.5)$$

ここで、 L_n ：経路 n の時刻 t から $t + \Delta t$ における浸水による歩行割引率を考慮した換算値(m)、 L_n ：経路 n の延長(m)、である。

- 5) 4) で計算した全ての避難所ノードまでの最短距離の中から、距離が最小となる避難所を新たに目標とする避難所とする。
- 6) リンクの途中で避難所ノードを再検索する必要がある場合（シミュレーション途中で通行不

図-1 避難者・避難所とネットワークの関係

図-2 避難行動解析のフロー

- 可リンクが発生した場合など）、リンクにおける避難者の進行方向の終点ノードから上記4) 5) を実施して再検索をおこなう。検索した距離には L_1 を追加する。
- 7) 6) で経路が見つからない場合は起点側のノードから検索をおこなう。検索した距離には L_2

を追加する。

- 8) 時刻 t において、6) で求めた最短経路を F_{N_i, s_i} と仮定した場合、まず N_1 を目的地として N_1 迄の所要時間 T_N を L_1 と歩行速度から算出する。歩行速度は式 (2.1) により求める。
- 9) 1回の避難行動で避難者が移動できる時間 T (本研究では 60 秒) 内に N_1 に到達できない場合、 T 時間分だけ移動させ、避難者の位置 (リンク起点からの距離) を記録する。
- 10) 1回の避難行動で目的ノード N_1 に達した場合、 N_1 までの所要時間を用いて N_1 まで移動する。 N_1 が避難所ノードであれば避難成功、そうでなければ $T = T - T_N$ として 2) に戻り、残り時間となる T を用いて移動を続ける。

3. システムの適用

3.1. 適用場所

ここでは、あくまでもシステムの適用例を示すことのみを目的とするため、システムの適用場所には土木学会発行の水理公式集例題プログラム集 (井上, 2002) の氾濫解析の対象地と同じ場所とし、破堤点や流出流量も同じとして避難行動解析を実施することとした。

3.2. 使用データ

本研究における避難行動解析で使用したデータ類は表-1のとおりである。

表-1 使用データ一覧

項目／出典	内容
数値地図 25000 (空間データ基盤) / 国土地理院	道路ネットワーク、道路幅員、行政界および避難所の位置
数値地図 25000 (地図画像) / 国土地理院	背景画像
氾濫解析結果 / 土木学会	二次元不定流解析結果

3.3. 避難行動解析の実行例

解析対象地で避難行動解析を実行する。氾濫解析のメッシュサイズは約 250m とし、避難者グループは図-3 に示すようにメッシュの中心に全部で 515

グループ配置した。避難所は対象地に存在する公共施設を設定した。

図-3 初期状態

3.3.1. 地域の現状把握

開発したシステムは避難者、避難所、破堤点を指定し、避難者の特性 (人数、初期歩行速度など) を入力することで、避難状況の確認ができるようになっている。

まず、通常の最短経路解析により、最短の避難所までの経路を設定し (図-4)、各避難者グループが最初に目指す避難所を定義する。避難者グループは大人グループ (歩行速度: 1.42m/s) とし、グループ人数は一律 100 人とした。

最短経路解析の実行後、以下の事項の出力が可能になる。

- 1) 避難所割り当て結果
- 2) 区域別避難時間
- 3) 区域別避難距離

図-5 は避難所割り当て図であり、避難所の収容人数に不足がないか、備蓄品量が適切かなどを検討する。

図-6 は区域別所要時間図であるが、北西部に避難所が存在せず、避難に約 50 分程度要しており、一時避難所の設置などの対策が必要な個所であることがわかる。このように、システムを用いることで避難所の不足 (避難者収容可能人数の不足)、避難に要する時間が不適切、といった現状の把握が可能である。

図－４ 避難経路図

図－５ 避難所割り当て図

図－６ 区域別所要時間図

3.3.2. 避難行動解析による被災時の状況予測

次に、想定破堤点を設定し、洪水氾濫解析とリンクした避難行動解析を実施し、被災時の状況をシミュレートする。避難行動解析は次の２ケースを試みた。なお、避難者グループは高齢者を含むグループ（歩行速度：0.751m/s）とし、グループ人数は一律 100 人とした。

(1) ケース 1：破堤 10 分後に避難開始

ケース 1 では避難指示が遅れた、避難の判断が遅れた場合を想定し、破堤 10 分後に避難を開始した場合をシミュレートする。

(2) ケース 2：破堤 20 分前に避難開始

ケース 2 では河川水位が上昇し、破堤が懸念され始めたところに避難開始することを想定し、破堤 20 分前（実際には破堤時刻の予測は困難であるが、便宜上このように記す）に避難を開始した場合をシミュレートする。

避難行動解析の結果は表－2 のとおりとなった。ケース 1 とケース 2 を比較すると、避難開始時刻が 30 分早まることで、49 グループ（4,900 人）が被災せずに済むことが示された。この他、破堤位置、避難開始時刻などを変更した数多くのシナリオを作成し、避難行動解析を実施することで避難命令発令のタイミング検討や、解析時に混雑が見られた箇所への人員配置計画などに適用できるものと考えられる。

表－2 避難行動解析結果（単位：グループ）

ケース	避難成功	避難失敗
ケース 1	450	65
ケース 2	499	16

4. おわりに

本研究では、洪水防災対策を策定するための基礎資料となる、洪水氾濫時における住民の避難行動をシミュレートする避難行動解析システムを開発した。本システムの適用例として、避難行動シミュレーションによる問題点の抽出と改善策の検討により、避難所・避難路計画、避難命令の発令基準の策定などに適用できることを示した。また、住民の防災意識の啓発を支援するツールとしての可能性を示すこ

(a) 避難開始から 20 分後 (破堤 30 分後)

(a) 避難開始から 20 分後 (破堤直後)

凡例 避難中 避難成功 避難失敗 避難所 破堤点
浸水深 黄 ~0.5m 緑 ~1.0m 青 ~2.0m 紫 ~3.0m 赤 ~4.0m

(b) 避難終了時 (避難開始から 181 分後)

図-7 ケース 1 の避難行動解析

凡例 避難中 避難成功 避難失敗 避難所 破堤点
浸水深 黄 ~0.5m 緑 ~1.0m 青 ~2.0m 紫 ~3.0m 赤 ~4.0m

(b) 避難終了時 (避難開始から 65 分後)

図-8 ケース 2 の避難行動解析

とができた。

本システムはまだ発展途上であり、実際の地域には適用していない。今後は道路の高低差や建物構造といった地域特性に関する属性を加えることで、実際の避難計画への適用や住民説明での利用など、とくに早期避難の重要性の周知を図るためのツールとして効果的な活用方法を模索するとともに、更なる研究を進めたいと考えている。

謝辞

本研究の実施にあたり、中川一教授（京都大学防災研究所）から数々の貴重なご教示を頂きました。ここに深い感謝の意を表します。

参考文献

- 井上和也（2002）洪水氾濫流の計算，（土木学会水理委員会 水理公式集改訂小委員会 水理公式集例題プログラム集編集部会編），『水理公式集 例題プログラム集 平成 13 年版』，丸善，例題 2-3.
- 国土交通省河川局治水課（2005）『洪水ハザードマップ作成の手引き』.
- 中川一・高橋保・澤田豊明・石橋晃睦（1997）GIS を用いた避難行動の解析－岐阜県古城郡上宝村栃尾地区周辺を対象に－，「京都大学防災研究所年報」，40 B-2，397-407.
- 西原 巧（1983）氾濫解析に基づく避難システムの河川工学的研究，博士論文，京都大学大学院工学研究科.