

氾濫解析及び避難経路解析を用いた  
沿岸域における水災害危険度の評価

2016年3月

佐賀大学大学院工学系研究科

システム創成科学専攻

森田 俊博

## 目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景	2
1.2 本論文の構成	3
参考文献	4
第2章 我が国の水害	5
2.1 はじめに	5
2.2 我が国の特徴	5
2.2.1 地形	5
2.2.2 気候	5
2.2.3 都市化	7
2.3 我が国の大水害	9
2.4 対象地域の水害	12
参考文献	15
第3章 近年の研究	16
3.1 近年の研究	15
3.2 本研究の特徴	21
参考文献	15
第4章 洪水氾濫の数値解析	23
4.1 はじめに	23
4.2 計算格子	23
4.3 計算格子の作成	25
4.4 解析理論	28
4.5 氾濫解析の適用の条件	35
4.6 氾濫解析の結果	42
4.7 第4章の結論	51
参考文献	54
第5章 避難経路選定	55
5.1 はじめに	55
5.2 避難経路選定システム	56
5.2.1 避難者	56
5.2.2 移動経路のネットワークモデル	58
5.2.3 氾濫解析との接続	59
5.3 避難行動解析の理論	60
5.3.1 避難開始の決定	60

5. 3. 2	避難場所の決定	60
5. 3. 3	最短経路の決定	60
5. 3. 4	その他の設定	62
5. 3. 5	歩行者モデルの移動方法	64
5. 4	避難経路の検証	66
5. 5	第5章の結論	74
	参考文献	76
第6章	避難計画への適用	77
6. 1	はじめに	77
6. 2	避難優先度から見た避難計画	77
6. 3	避難所の位置から見た避難計画	83
6. 4	最短経路から見た避難計画	86
6. 5	第6章の結論	87
	参考文献	88
第7章	避難計画の作成	89
7. 1	はじめに	89
7. 2	冗濫解析の材料	89
7. 3	避難解析の材料	90
7. 4	避難の優先度の決定	91
7. 5	避難所の位置に関する検討	95
7. 6	第7章の結論	97
	参考文献	98
第7章	結論	99

# 第1章 序論

## 1.1 研究背景

我が国では治水対策として水害の発生を防ぐ防災の考えからダムや遊水地の整備や河川改修などの対策がなされてきた。台風の日本への接近件数は1951年以降、決して減少しているとは言えない<sup>1)</sup>にもかかわらず、被害が減少しているのはこれらの対策の効果であるといえる。

一方、近年では2011年の東北地方太平洋沖地震による津波、2012年の九州各地で大きな被害を出した九州北部豪雨など、想定を超える自然災害が起こっている。このような災害が起こった際、沿岸域や都市域へ人口が集中する傾向がある我が国ではより大きな被害が生じる危険がある<sup>2)</sup>。このように、人口の集中した市街地で想定外の水害が起こることで河川技術が向上しているにもかかわらず毎年水害による死亡事故の報告が後を絶たない。

こうした中で減災やソフト対策に焦点を当てた取り組みが活発化している。減災とは災害時に発生する被害を最小限に抑える取り組みを指し、避難対策の強化や情報の円滑な周知などのソフト対策によって行われる。行政も2001年の水防法の改善により浸水想定区域の指定について記載し、ハザードマップの作成を推進してきた。さらに、東北地方太平洋沖地震を受け、2011年6月に「津波対策の推進に関する法律」を制定し、その中で「連携協力体制の整備」や「津波に関する防災上必要な教育及び訓練の実施等」などソフト対策の推進を掲げている。

しかしながら、現行のハザードマップの定義としてマニュアル<sup>3)</sup>には、「浸水想定区域が記載されていること」、「避難情報が記載されていること」、「市町村長が作成主体となっていること」と記載されており、特に避難情報の量については自治体ごとに差がある。さらに、一度作成されたハザードマップは都市開発や河川整備に伴った更新がなされない例も多々あり、その認知度や評価も決して高いとは言えない<sup>4)</sup>。

避難における自助、共助、公助のバランスも重要である。自助は自分とその家族の命は自分たちで守るというもので、共助は近隣住民との連携によりお互い避難し合うというもので公助は行政や専門職によって助けてもらうというものである。一般にこれらの理想的な比率は7:2:1であるといわれるが、阪神淡路大震災のころから自助の比率の低下が問題視されている。

このような変化の原因は治水施設の発展、ハザードマップなどの情報からの安全な印象の蓄積、多くの台風、豪雨が発生する中自身が被害にあった経験が少ないといったものがある。これらが台風や豪雨時に避難決定の阻害要因となり、避難しないうちに危機が去り、さらに安全な印象を蓄積する。このような理由から住民は豪雨や台風の際に避難しないものと思われる。

近年のハザードマップは情報を豊富に記載することで住民に多くの知識を与えるものが多いが、その中で被害の減少や治水施設の情報などが記載されており、かえって住民の水害発生認知度を下げている例もある。

また、近年では避難の途中に氾濫流に接触し命を奪われるケースが報告されている<sup>5)</sup>。これは単純な湛水深の表示のみではなく、避難経路の安全性についても評価を行う必要があること

を意味する。また、近年では予測される湛水深が小さい場合、自宅などで二階へ避難することで難を逃れる、所謂垂直避難の重要性も認められている。

以上のことから、今後の減災対策の向上のためにはハザードマップの改善をはじめ、避難経路の安全性や有効な避難方法の検討、住民に与えるべき防災情報の選定などの避難対策の更なる発展が急務であると考えられる。

そこで本研究では高潮や洪水のリスクを伴う沿岸域を対象として被害が予測される状況を想定し、それらの被害をいかにして軽減するかを洪水氾濫解析や避難経路解析を用いて、湛水深による危険箇所や避難を行う上での危険箇所を抽出することで検討を行う。その後、避難計画作成時の重要な判断材料になりうる情報を提言することを目標とする。

## 1. 2 本論文の構成

本論文は以下の章で構成される。

第1章ではこの研究の背景及び目的と本文の構成について説明を行う。

第2章でははじめに日本の水害の特徴を示し、我が国にとって避難対策が重要であることを示し、近年の災害について例を挙げてその特徴などの解説を行う。最後に、類似する分野の研究のレビューを行いつつ本研究の目標、必要な研究の方法について明示する。

第3章では本研究で行った氾濫解析の方法や格子形成の特徴、条件設定の方針などを示し、実際の沿岸域を対象とした氾濫解析を行う。さらにその結果をふまえて湛水深から見た危険個所の抽出を行い、以降の章に繋げていく。

第4章では前章で行った氾濫解析を踏まえた避難経路解析を行った。はじめに避難解析の方法や条件設定などを示し、その後避難解析の結果を提示しつつ対象地区における避難行動を行う上での問題点について検討を行った。

第5章では避難経路解析や氾濫解析の結果を参考にして、各々の結果から避難計画を作成する際の判断材料になるような検討を行う。

第6章にて第5章までに行ったケーススタディを参考として、より一般的な目線で避難計画を作成するためのプロセス等を示し、実践を踏まえつつ解説を行った。

第7章で本研究の総括を行った。

## 参考文献

- (1) 「国土交通省 HP 台風統計資料」  
<http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typhoon/statistics/index.html>
- (2) 高橋保：洪水の水理-被害の評価と対策-, 396p., 2010, 近未来社.
- (3) 国土交通省水管理・国土保全局河川環境課水防企画室：洪水ハザードマップ作成の手引き(改訂版), 104p., 2013年.
- (4) 牛山素行・今村文彦・片田敏孝・吉田健一：高度防災情報時代における豪雨災害時の住民行動－2002年月台風6号豪雨災害事例として－, 水文・水資源学会誌, 17, pp.150-158, 2004.
- (5) 山本ら：2009年台風9号により8月9日に兵庫県佐用町で発生した豪雨の特徴と洪水災害の概要, 自然災害科学, pp.421-439, 2012.

## 第2章 我が国の水害

### 2.1 はじめに

本章では我が国における水害の特徴及び近年起こった大きな水災害についてまとめ、我が国の水害における課題や教訓について説明を行う。

### 2.2 我が国の特徴

#### 2.2.1 地形

我が国は、狭小な国土であり、かつ非常に急峻な地形である。そのため、流れる河川も一般に流路が短く流域面積も狭小で、勾配も急となっているものが多い。他国の河川と比べると、その特徴を確認できる（図 2.1.1）。このような地形では、降雨の際に短期間で増水する傾向があり避難を行う際の猶予時間が短い傾向がある<sup>1)</sup>。また、急な勾配ゆえ強い流体力を有し、それに対応する堤防などの水理構造物もより強固なものが必要となる。

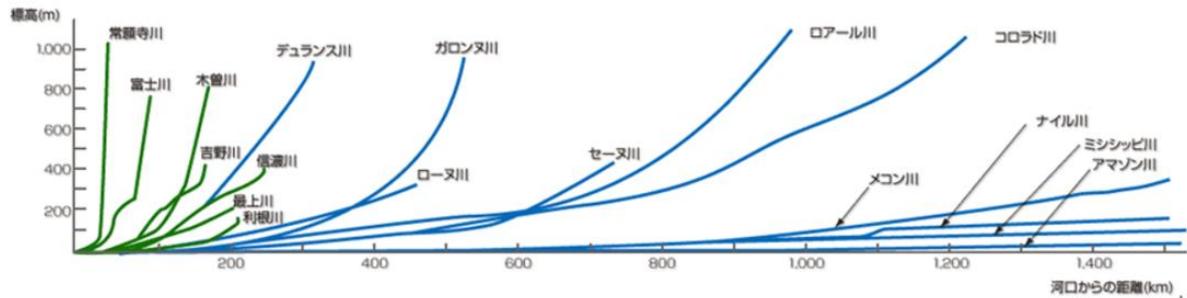


図 2.2.1 我が国と諸外国の河川勾配の比較<sup>2)</sup>

#### 2.2.2 気象

我が国は温帯多雨、亜寒帯多雨気候区に属し、年平均降水量は世界平均の約2.1倍の1718mmに達する（図2.2.2）。さらにアジア大陸の東端に位置する我が国は大陸性の気候と海洋性の気候の間に位置するため季節ごとに変化に富んだ気候である。中でも6月には梅雨前線による長時間にわたる雨が頻発し、9月には太平洋に発生した熱帯低気圧が台風となり上陸し、大きな水災害を引き起こす。

また、近年では地球温暖化の影響で大気中の水蒸気量が増加し、それに伴って局地的に集中した豪雨の発生が多く観測されている（図 2.2.3）。集中豪雨の増加によって河川氾濫のリスクも上昇しているといえる。水害のリスクが上昇する中で我々はさらに有効な水害対策を行っていかねば被害の増加は免れないであろう、

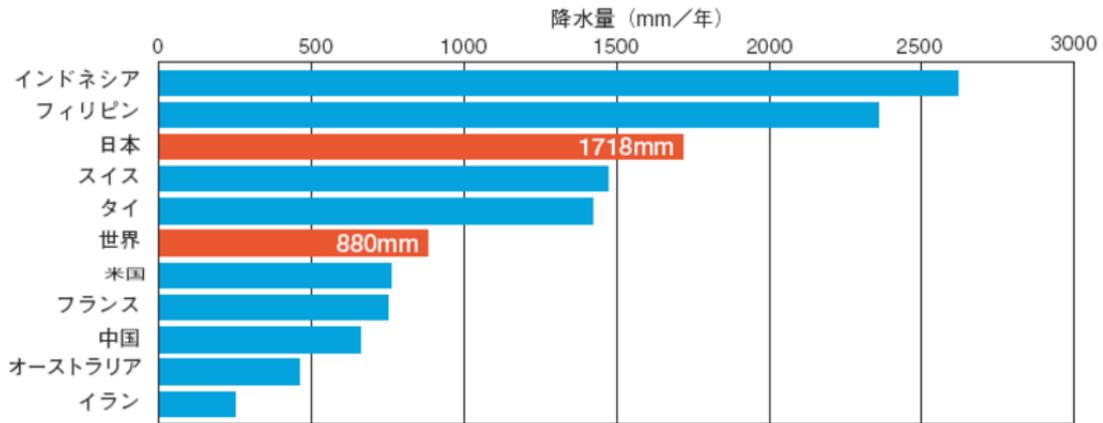
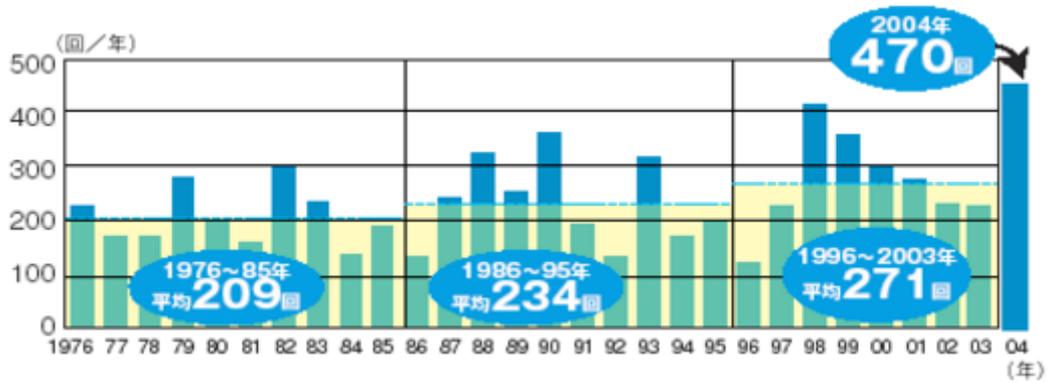


図 2.2.2 世界の年降水量(1971-2000年の平均)<sup>2)</sup>

時間雨量50mm以上の降雨の発生回数



時間雨量100mm以上の降雨の発生回数

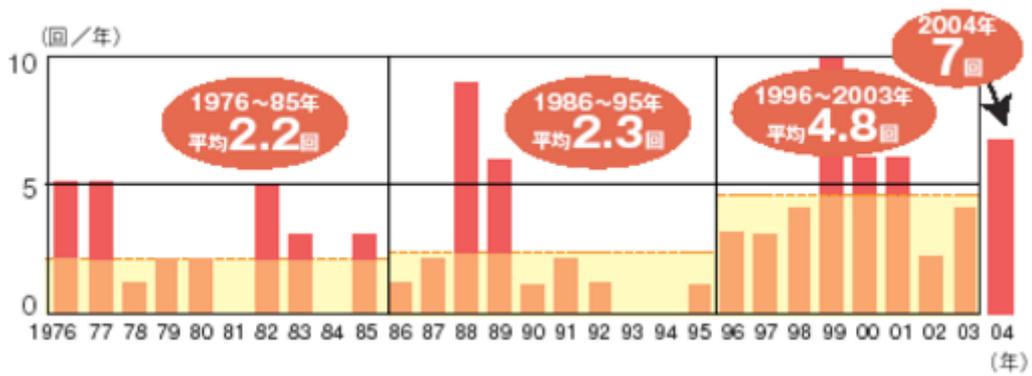


図 2.2.3 時間雨量 50mm, 100mm の降雨の発生回数<sup>2)</sup>

### 2. 2. 3 都市化

日本の洪水氾濫域（洪水時の河川水位より低い地域）は日本全土の 10%にしかすぎないが、その地域に人口の 51%、総資産の 75%が集中するため、ひとたび洪水氾濫が発生すれば、その被害は深刻なものになる。現に、戦後様々な治水対策が行われ、全国的にみると浸水面積は減少傾向にあるが、近年、水害による被害額は増加傾向を示している（図 2.2.4）。過去 5 年間の水害被害額の平均をとって年ごとに比較すると、1995 年の一般資産被害額約 1622 億円が、2004 年には約 4360 億円（95 年の価格換算で）となっており、10 年間で 2.6 倍以上に急騰した。浸水面積 1ha 当たりの被害額である水害密度は、1995 年の約 2123 万円に対し、2004 年には約 4494 万円と、10 年間で 2 倍以上になった。

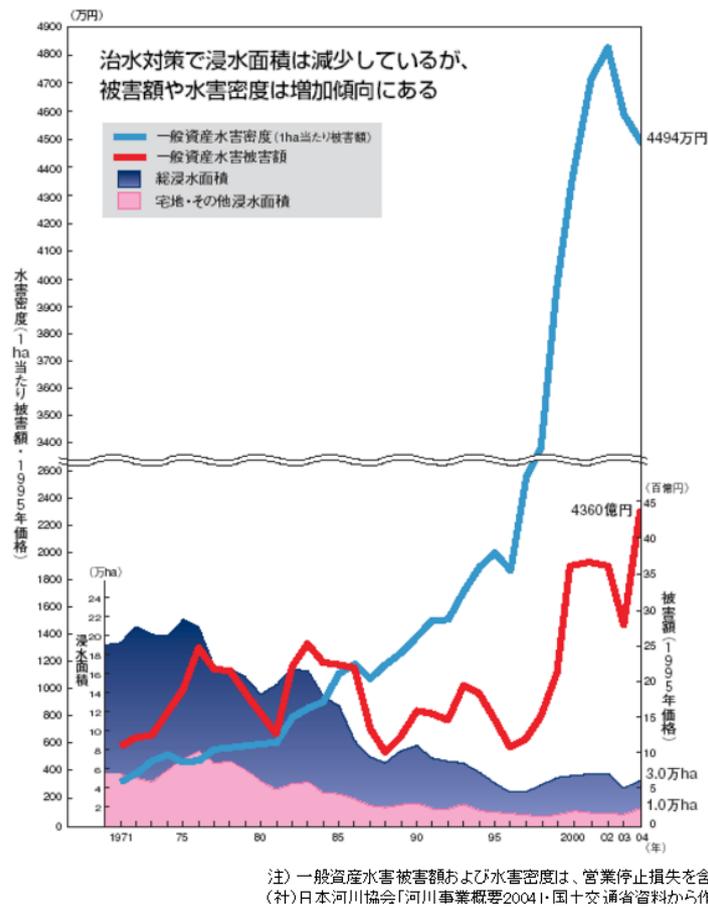


図 2.2.4 水害被害額および水害密度等の推移（過去 5 年平均）<sup>2)</sup>

また、道路などの舗装がなされている都市部では外水のみならず内水氾濫の被害も多発している。本来なら土中に浸透することで水位の低減が起こるがコンクリートやアスファルトは水を吸収せず、多くはない雨量でも滞留を起こす場合がある。

被害額に着目すると東京都では水害被害の8割が内水による被害で、全国で見ても46%が内水によるものである

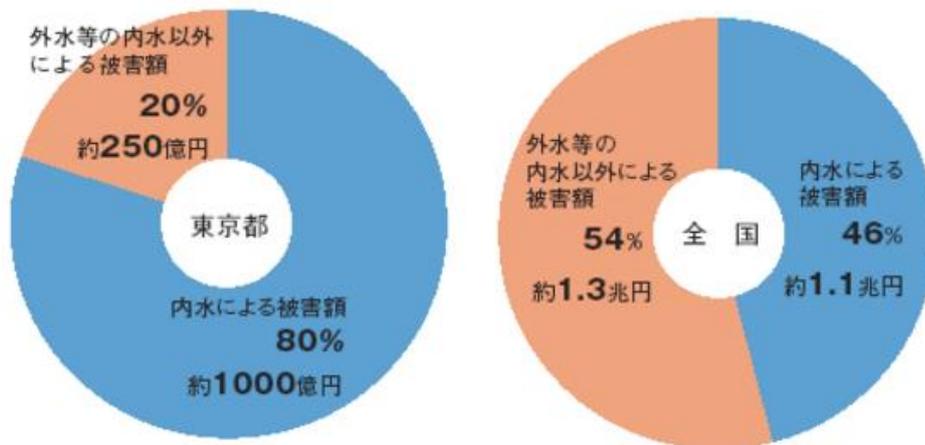


図 2.2.4 1993～2002 年の内水、外水の被害額<sup>2)</sup>

## 2. 3 我が国の大水害

我が国では近年非常に大きな被害をもたらす自然災害が多発している，その中で 2012 年に九州北部を襲った九州北部豪雨は非常に広い範囲で被害を出した．この災害の後，多くの専門家で構成された土木学会九州北部豪雨災害調査団によって調査・研究が行われ，平成 24 年 7 月九州北部豪雨災害調査団報告書<sup>3)</sup>としてまとめられている．以下にこの災害の特徴を報告書から引用したものを記載する．

### ・ 2012 年 7 月九州北部豪雨の概要

2012 年 7 月 3 日と 11~14 日に本，大分，福岡，佐賀などの九州北部を襲った梅雨前線性の豪雨である．これにより，図 2.3.1 に示した筑後川や六角川等多くの一級河川や二級河川に被害をもたらし，これらの河川の多くの観測所で既往最大降雨量が観測され，それに伴って既往最大流量や既往最大水位が観測された．この豪雨で，いくつかの河川で決壊が起こり，特に矢部川では長時間氾濫危険水位の状態が続き，パイピングによる堤防決壊が生じ甚大な被害を出した．また，山国川と筑後川支川花月川では，7 月 3 日の豪雨で氾濫が起こり，その復旧が完了した直後の決壊となった．

この豪雨を受けて公益社団法人土木学会では災害調査団を組織し，各河川の災害の基礎調査，発生機構の解明，教訓の抽出，さらには海域へ流出した流木の検証，人的被害の要因分析，九州電力管内の水力発電所の被災状況，復旧へ向けた取り組み，などについても併せて調査を行った．



図 2.3.1 主な被災河川(赤字：氾濫，茶字：氾濫危険水位観測)<sup>3)</sup>



・ 1959 年伊勢湾台風<sup>5)</sup>

1959 年の 9 月 26 日に発生した台風 15 号は紀伊半島から東海地方までほぼ全国に亘る巨大な台風で、各地で甚大な被害を起し、犠牲者 5,098 人(死者 4,697 人・行方不明者 401 人)・負傷者 38,921 人の大きな被害となった。この台風の被害の特徴は、伊勢湾奥部で既往最大潮位を 1m 近く上回る 3.55m の高潮が発生した。この高潮は防災対策の不十分なまま都市化をしてきた地帯に来襲し、日本最大のゼロメートル地帯に大きな爪痕を残した。また、高潮災害の危険地帯であった場所である自覚や警戒心の不足や、夜間の襲来もあって被害のさらなる増加につながった。我が国は小さな国土を活用するために多くの場所で干拓事業が行われている。このような場所では伊勢湾台風のように高潮による被害を想定した防御策を必要とすることが教訓とされた。

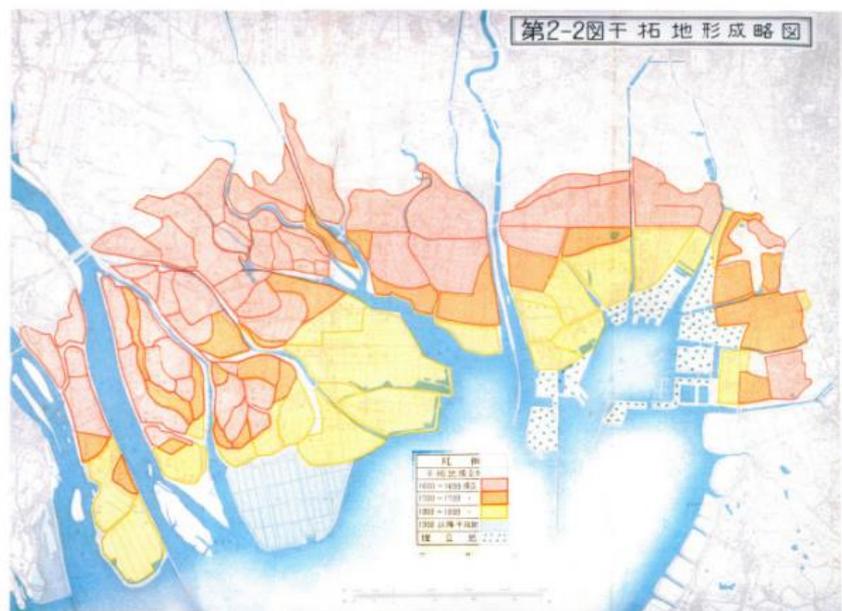


図 2.3.3 伊勢湾の干拓地形成過程<sup>5)</sup>

## ・1962年7・8水害<sup>6)</sup>

本研究で対象とするのは佐賀県鹿島市の浜地区である。ここは石木津川、浜川の2つの河川に挟まれており、過去に2度、浜川からの越流氾濫によって甚大な被害を出している。また北東部には日本最大の干満差を有する有明海が広がっており、高潮による被害のリスクも有している。また域内には高潮対策として設置された堤防もあり、河川からの氾濫水の対中が起これといった事態も起これている。

この地域ではいくつか大きな洪水被害を受けているが主なものを鹿島市災害史<sup>6)</sup>によると以下のようなものである。

### i. 流入状況

薬師橋に流木が滞留したことで石積堤を越水し、堤外側が洗掘されて、石垣が崩壊、流出し、大量の越水が生じた。多々良川(浜川の支川)からの洪水が浜川と合流し、浜川の洪水流量を増大させたことが大きな要因である。越水は薬師橋を中心に生じ、越水の高さは、およそ45cmで、流入流速はとても大きかった。越水による流入時間は1時間から1時間半であった。

### ii. 氾濫状況

氾濫水は図2.3.4の青線で囲った範囲で起こった。流入を初めて30分程経過した時点で、図中の①で水深2m程度に達し、この地域で3名が流され、1名が死亡した。②で2m程度、③では約0.6m、④では2m以上に達しており、かなりの低地であるため水が滞留した。⑤では1m以上である。

### iii. 排水時間

排水時間は2~4時間程度であった。排水箇所はJR線の下2箇所(1箇所は駅の下で直径0.6mの樋管、1箇所は高さ2.3mの道路トンネルである。)

### iv. 被害状況



図 2.3.4 昭和 37 年水害の浜地区の浸水の様子<sup>7)</sup>

全壊 13 戸，流出 9 戸，半壊 21 戸，床上浸水 2335 戸，床下浸水 2286 戸であった。

この豪雨では佐賀県全体にも大きな被害を出しており，図 2.4.2 に示すように多くの場所で道路や橋梁，堤防部被害が出ている。

・昭和 51 年水害

i. 流入状況

薬師橋に流木がひっかかり，それによって薬師橋上流部で越水した。今回は，石垣の崩壊はなかった。越水の高さは，およそ 30cm で，流入時間は 30 から 40 分であった。

ii. 氾濫状況

湛水状況および流入から冠水するまでの時間は昭和 37 年水害と同様であった。①での水深は 1.5m 程度，②では軒下に達し，③では床下浸水で，30cm 程度，④では 1m 強，⑤には氾濫水がこなかった。

iii. 排水状況

昭和 37 年水害時と同様であった。

iv. 被害状況

全壊 6 戸，半壊・一部破壊 15 戸，床上浸水 662 戸，床下浸水 2020 戸であった。

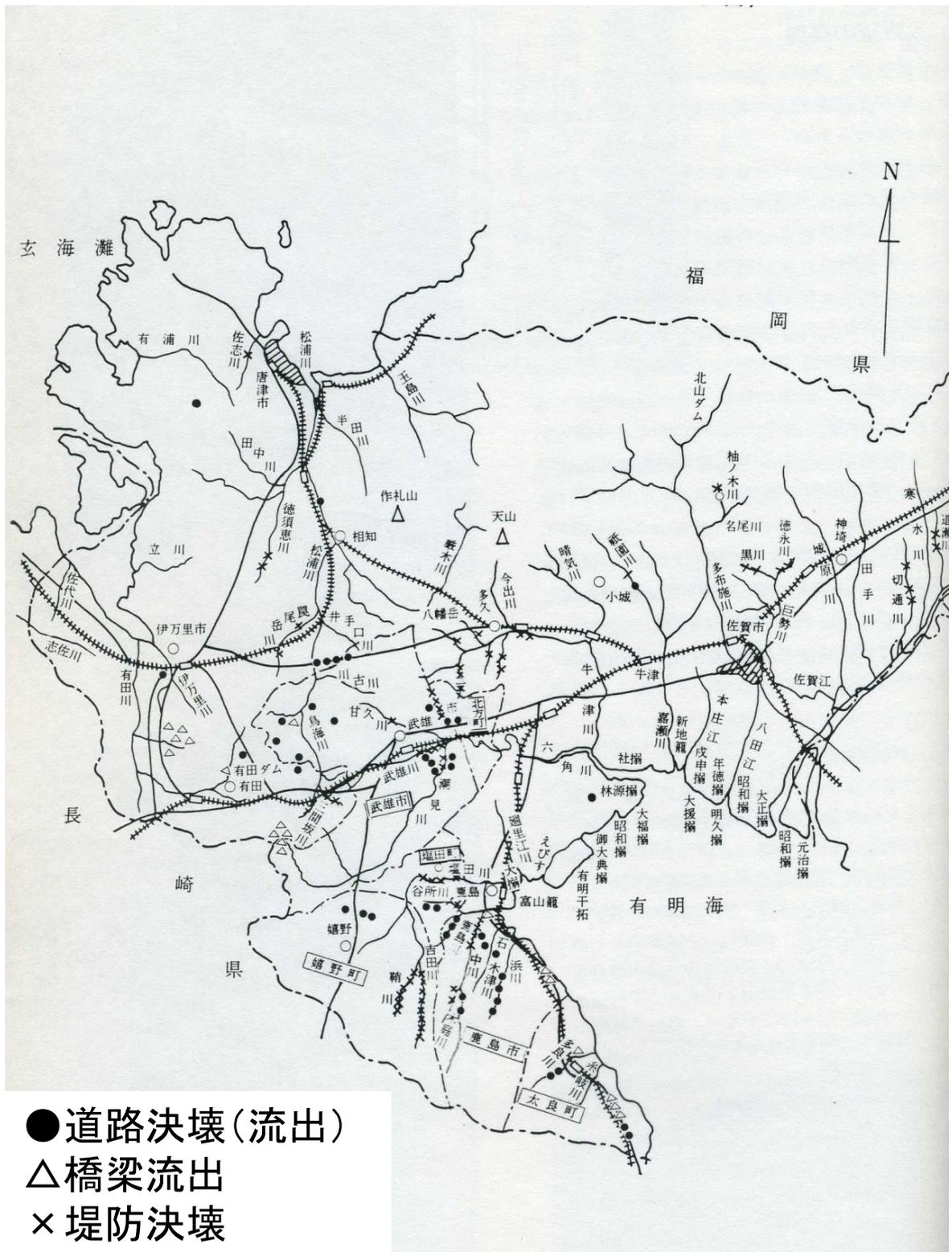


図 2.4.2 昭和 37 年水害の佐賀県県下の被害状況<sup>6)</sup>

## 参考文献

- (1) 西原巧：氾濫解析の基づく避難システムの河川工学的研究，京都大学博士論文，215p., 1984.
- (2) 国土交通省：「水害対策を考える HP」  
[http://www.mlit.go.jp/river/pamphlet\\_jirei/bousai/saigai/kiroku/suigai/suigai.html](http://www.mlit.go.jp/river/pamphlet_jirei/bousai/saigai/kiroku/suigai/suigai.html)
- (3) 土木学会九州北部豪雨災害調査団：平成 24 年 7 月九州北部豪雨災害調査団報告書，pp. 1-5, 2013.
- (4) 総務省消防庁：東日本大震災記録集.  
[http://www.fdma.go.jp/concern/publication/higashinihondaishinsai\\_kirokushu/](http://www.fdma.go.jp/concern/publication/higashinihondaishinsai_kirokushu/)
- (5) 内閣府：防災情報のページ  
<http://www.bousai.go.jp/index.html>
- (6) 鹿島市：鹿島市災害史 第二巻.
- (7) 松岡晋：水路・道路網系における洪水氾濫水の流れ解析，佐賀大学卒業論文，42p, 2008.

### 第3章 近年の研究

#### 3.1 既往の研究

これまで述べたように水害に対するリスクの高い日本では水害をキーワードとした多くの研究が行われてきた。いくつか概要を示す。

川池ら(2002)<sup>1)</sup>は避難計画を念頭に置いた氾濫解析を行うために、4種類の計算手法を用いて氾濫解析を行い、比較することでそれぞれの利点と欠点を示した。その中で、非構造格子モデルや街路ネットワークモデルが複雑化した市街地を対象とした氾濫解析の手法として有効である反面、格子形成の労力が必要であることを示した。

川池らの研究から非構造格子や街路ネットワークシステムが有効であることが示された。その理由の中で最も重視されたのは道路の再現度である。デカルト座標系モデルでも極めて小さいメッシュを使用すれば再現率は上がるものの計算によるコンピュータへの負荷も増大する。これらの知見から、道路とその他の場所(街区)を格子上で区別化できれば道路に重点を置いた解析が可能であることが分かる。さらに街区においては凡その浸水深や流速が判ればよく、計算負荷の軽減には街区のメッシュの簡略化も必要であると考えられる。

本研究においてもこの知見を参考に、道路と街区で区別をつける、若しくは分けてモデル化を行うことが計算負荷軽減、計算の精度のうえで有効であると考えられる。

須賀ら(1995)<sup>2)</sup>は大型の水理模型を使って水中歩行を実際に行い水深、流速を変化させて被験者の歩行状況の観測やその後のヒアリング調査を行い、水中歩行の可否の判定に有用な安全避難領域図などを示した(図3.1.1)。

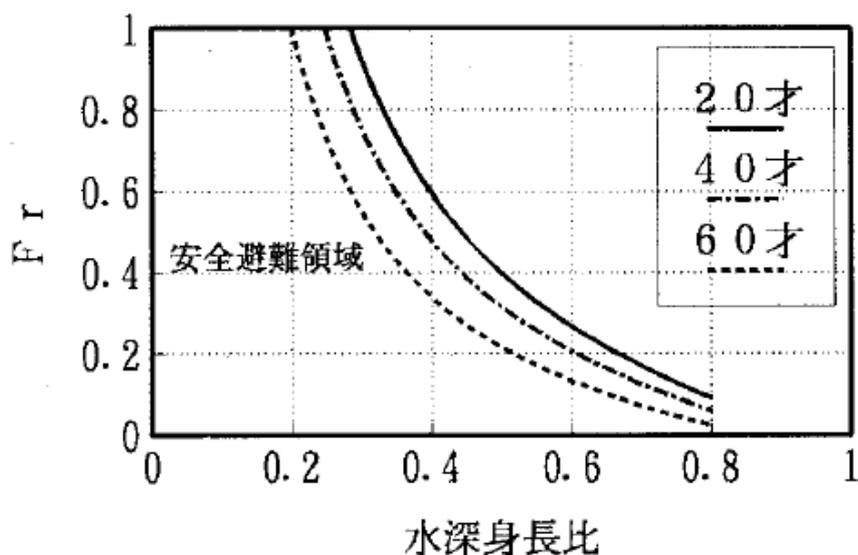


図 3.1.1 安全避難領域図<sup>2)</sup>

この須賀らの研究で作成された安全避難領域図は水深身長比とフルード数を基準として作成されており、ある流れの中でどの程度水に浸かると歩行できなくなるかを示している。この図は後に須賀の参加する利根川研究会による書籍<sup>3)</sup>の中でフルード数ではなく流速を用いたものに改良されより使いやすくされた。この水深身長比と流速による判定は中山ら<sup>4)</sup>などはじめ多くの研究で参考とされている。

本研究において避難解析を行う際も水深のみならず流速も参考とする。その理由は氾濫流入箇所と標高の低い個所の間では流れが速くなることがあり、その危険性は湛水深のみでは把握しにくいからである。

牛山ら(2004)<sup>5)</sup>は2002年7月10～11日に起こった台風6号および梅雨前線による豪雨災害の直後に、最大の浸水被害を生じた岩手県南部を対象としてヒアリング調査を行った。その結果、対象者のおよそ76%が車での移動を行ったこと、40～50%の住民が畳上げや家電製品の移動など家財保護を行ったことが分かった(図3.1.2)。またリアルタイムの水位、雨量情報を閲覧した住民はわずか5%ほどで、ハザードマップに関しても53%の住民が見たことあると回答したにもかかわらず、役に立ったと答えたのはわずか9%だったことを明らかにした(図3.1.3)。

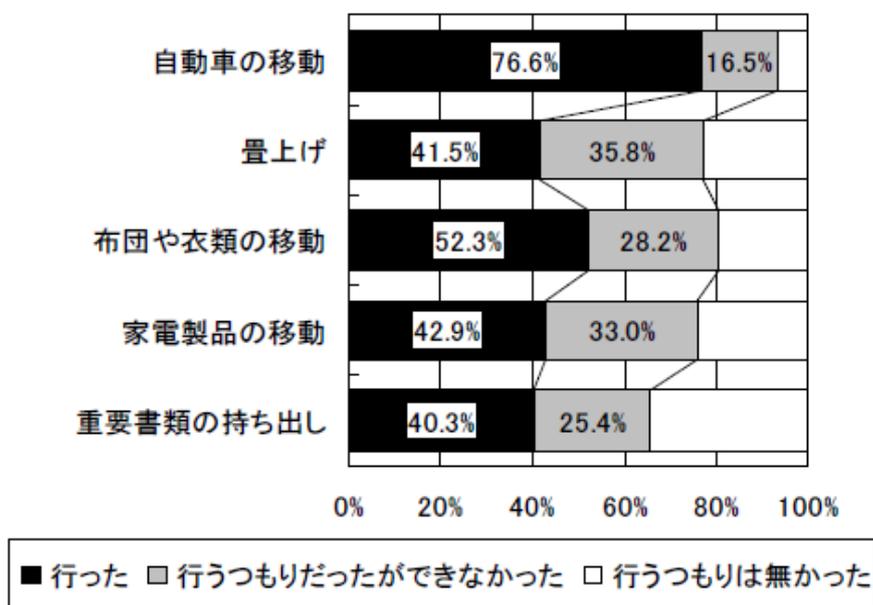


図 3.1.2 浸水時の家財保全行動<sup>5)</sup>

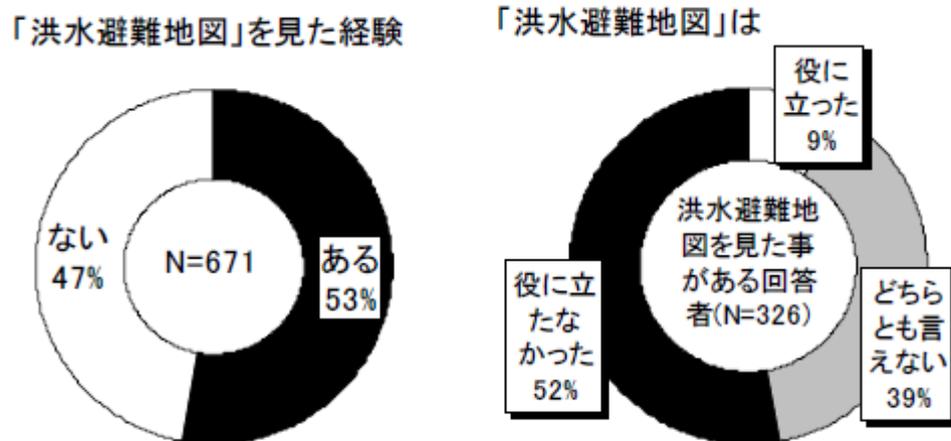


図 3.1.3 ハザードマップに対する認知と評価<sup>5)</sup>

牛山らの研究から住民の多くが財産の保守を先に考え即座に避難を決定する住民は多くないことが伺える。さらにはハザードマップに関して住民はあまり重視しておらずその評価も高いとは言えなかった。このように住民は自ら避難行動を行わないことが多く、避難指示による避難が主である。また、多くの住民が避難所の距離や歩行労力から自動車での避難を行いがちである。実際水害時では自動車による避難は水中の停車による事故のみならず乗り捨てなどにより他の避難者や緊急車両の妨げになりうるものである。一方で以下のような研究結果もある

片田(2012)<sup>6)</sup>らは自らが開発した「災害総合シナリオ・シミュレータ」を用いてリアス式海岸(尾鷲市)と広い平野部(ロングビーチ半島)を対象として津波災害時、自動車避難の人的被害への影響度について検証した。その結果、自動車の利用は被害の増大に直結しやすく(図 3.1.4)、徒歩による避難が強く求められることを示した。ただし、自動車の量に制限を加え、管理すれば被害の増大を抑えることもできることも示した。

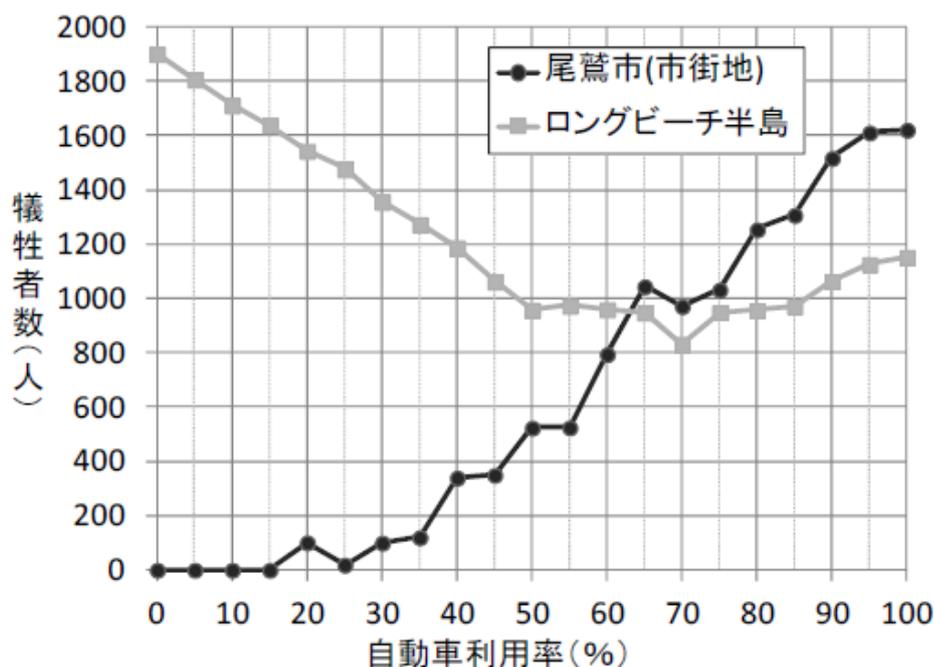


図3.1.4 避難時の自動車利用と被害者数の関係<sup>6)</sup>

このように多くの健康な避難者が無秩序に自動車避難を行った場合被害の増加が予想されるが、片田らの示すように避難に自動車を用いることが必須である要救護者のみに許可を出すなどして制限を加えることで被害を軽減できるかもしれない。

このように自動車の使用には強い制限を加える必要があり、一般には使用を控えるべきである。このような考えから本研究では歩行避難のみの避難検証を行うものとする。

牛山ら(2004)<sup>9)</sup>の研究でハザードマップの評価が低いと述べたが、以下のような研究も公表されている

片田ら(1999)<sup>7)</sup>は平成10年3月に岩手県関市で洪水ハザードマップが配布された後に防災意識にどのような効果があったかを調査した。結果として配布直後では洪水の発生可能性の認識が高くなり自宅の浸水予想や避難場所についての情報に興味を示したことが示された。一方で治水施設の効果で安全性が上がったこと、近年は洪水被害が著しく減少していることなどの情報が避難の妨げになりうることを示した。結果として、後者の印象が強く配布前後で行動面の変化は認められなかった。

このようにハザードマップなどの防災情報は人命や財産にかかわることから一時的な防災意識向上へつながるといえる。ハザードマップの住民から見た評価基準は情報の豊富さや自身を守るための情報によるところだが、避難計画を作成する立場で見ると、安全はイメージを与えることは有事の際、避難行動の鈍重化に繋がる。このような観点から、住民には水害上の危険度や経路の情報などを公表し、その他の情報に関しては避難行動への影響を検討する必要がある。

山本ら(2012)<sup>8)</sup>は2003年に起きた豪雨災害時の被害についての調査、報告を行った。その中で住民が100m離れた避難場所への避難中に氾濫流に巻き込まれ、水路に流され命を落とした事故について報告した。ここでの水深は80cmほどであり水中での歩行ができない流況であった。

山本らの報告からわずか100mの距離の移動で命を落とす被害が報告された。このように避難を開始しただけでは安全は確保されず、避難経路となる場所の安全性も重要であるといえる。また、避難の開始のタイミングも重要である。発災より早く避難することが重要であるが、実際は情報伝達や状況判断の面から難しく、むしろ避難しない方が安全である場合もある。実際の水害でどこまで水位が上がるか、どれほどの流体力を持つ流れが来るか予測が困難なため、2階などへの避難が有効とは言い難いが選択肢の一つとして重要であるといえる。

中山ら(2008)<sup>4)</sup>は福島県を流れる川内川流域を対象に流出解析を用いて氾濫解析を行い、その結果から得た浸水深と流速から歩行可能な範囲がどのように減っていくかをシミュレートした。その結果、山間部で時間が経つほど避難所へ到達可能な経路を確保できる範囲が狭くなり、最終的には極限られたルートしか使用できないことを示した。

中山らのように避難所とその周辺の歩行可能性を評価することは避難計画で重要な情報を得られると考えられる。実際の避難ではどのような移動が想定されるかを検証して、住民に伝えるべき情報の選定や避難指示を出す方針などを決めていくことは避難計画において重要であると考えられる。

高棹ら(1995)<sup>10)</sup>は水害避難時の避難行動に危険認知度や水害への知識、水害経験等の内部的な要素をファジー理論を用いることで避難解析に関連付けた。そしてこの用法は避難開始の意思決定の再現に効果を発揮することを示した。

高棹らの研究はモデル化が最も難しいと思われる避難者の心理的な条件を再現したものである。しかし著者自らが述べているようにモデル化の材料となるものはアンケート調査など習得が比較的難しいため、実際の避難計画では単純化されたモデルの作成に留まってもよいと考えられる。特に近年の避難開始の意思決定において大きな役割を果たすものは避難勧告などの直接的な指示になりつつある。このような理由から本研究では水深や直接的避難指示などの設定が容易なため、これらの検討を行う。

### 3. 2 本研究の特徴

これまでで述べたように住民に公表されるハザードマップは避難計画において重要な役割を果たすが不十分な点もある。特に、実際の災害ではハザードマップで想定されたものと違う特徴を持つことが多々あり、それによって想定外の被害が起こったり、住民から低い評価を受けたりする。この根底にはハザードマップや近年の研究がある確率年の降雨によるものや、最も起こりやすい、若しくは一定以上被害が予測される自然条件を一つ予測し、それを参考に考察、計画を行っていることがあると考えられる。そこで本研究では複数の水害に関してケース・スタディを行いそれぞれの特徴をふまえた避難計画の作成を目標とする。

さらに前節の研究レビューにより本研究では以下の要素を含むように行った。

- 氾濫解析を行う際には道路と街区を分けることが肝要であり構造格子の作成時にこの要素を取り入れる必要がある。
- 氾濫解析は単一の自然災害を想定するべきではなく、複数の自然災害を対象に解析を行うべきである。
- 氾濫水の危険評価は人的な被害を優先的に考え、人が歩行できるかの判断を基準とする。その基準には須賀らの水深身長比と流速によるものを採用する
- 避難解析では自動車の利用は考慮せず、歩行避難に的を絞る。
- 避難経路を選択した場合の避難の成否を検証し、経路の安全性として評価する。
- 結果の表示には危険個所を端的かつ明確に示す。こうすることで防災意識向上の阻害にならないようにする。

## 参考文献

- (1) 川池健司・井上和也・林秀樹・戸田 圭一: 都市域の氾濫解析モデルの開発, 土木学会論文集, No.698/II-58, pp.1-10, 2002
- (2) 須賀堯三・上阪恒雄・吉田高樹・浜口憲一郎・陳 志軒: 水害時の安全避難行動(水中歩行)に関する検討, 水工学論文集, 第39巻, 1995,2.
- (3) 利根川研究会: 利根川の洪水—語り継ぐ流域の歴史—, 山海堂, 1995.
- (4) 中山大地・森永大介・松山洋: 洪水氾濫シミュレーションに基づく避難経路の歩行可能評価, 地学雑誌, 117 (2) , pp.424-438, 2008.
- (5) 牛山素行・今村文彦・片田敏孝・吉田健一: 高度防災情報時代における豪雨災害時の住民行動, 水文・水資源学会誌, 17, pp.150-158, 2004.
- (6) 片田敏孝・桑沢敬行・渡邊 寛津波襲来時における自動車避難と人的被害の関係に関する一考察, 日本災害情報学会研究発表大会予稿集, 14<sup>th</sup>, pp.152-155, 2012.
- (7) 片田敏孝・及川康・杉山宗意・浅田純作: パネル調査に基づく一関市洪水ハザードマップの評価, 土木計画学研究・講演集, Vol.22, No.1, p.163-166, 1999.
- (8) 山本ら: 2009年台風9号により8月9日に兵庫県佐用町で発生した豪雨の特徴と洪水災害の概要, 自然災害科学, pp.421-439, 2012.
- (9) 高橋琢馬・椎葉充晴・堀智晴: 水害避難行動のマイクロモデルシミュレーションと制御に関する研究, 土木学会論文集, No.509/II-30, pp.15-25, 1995.

## 第4章 洪水氾濫の数値解析

### 4.1 はじめに

ここでは氾濫解析についての説明を行う。はじめに避難経路に重点に置いた氾濫解析を行う際にどのような格子が適しているかを比較しながら選定する。その後、対象地区である鹿島市浜地区を対象に氾濫解析を行い水害における危険個所について検討を行う。

### 4.2 計算格子

我が国の大都市の多くは海岸に沿った低平地や河川の氾濫によって形成された沖積平野の上に立地している。そのため、そのような立地の都市は度重なる洪水や高潮による被害を受けており、近年ではほぼ毎年水害が起こっている。

避難をはじめとした都市域での水害対策を考える際、氾濫水がどのような挙動を示すかを精度よく予測することが重要である。しかし、都市には道路や建物といった構造物が存在し、これらの氾濫水の挙動へ及ぼす影響は大きく複雑である。このような特徴を持つ都市域を対象とした氾濫解析モデルは多くの研究者によって考案されている。その分類方法の一つが解析格子である。川池ら(2002)<sup>1)</sup>はこれらを大きく分けてデカルト座標系モデル、一般曲線座標系モデル、非構造格子モデル、ネットワークモデルの四つに分類し、これらの比較検討を行った。以下にその概要を示す。

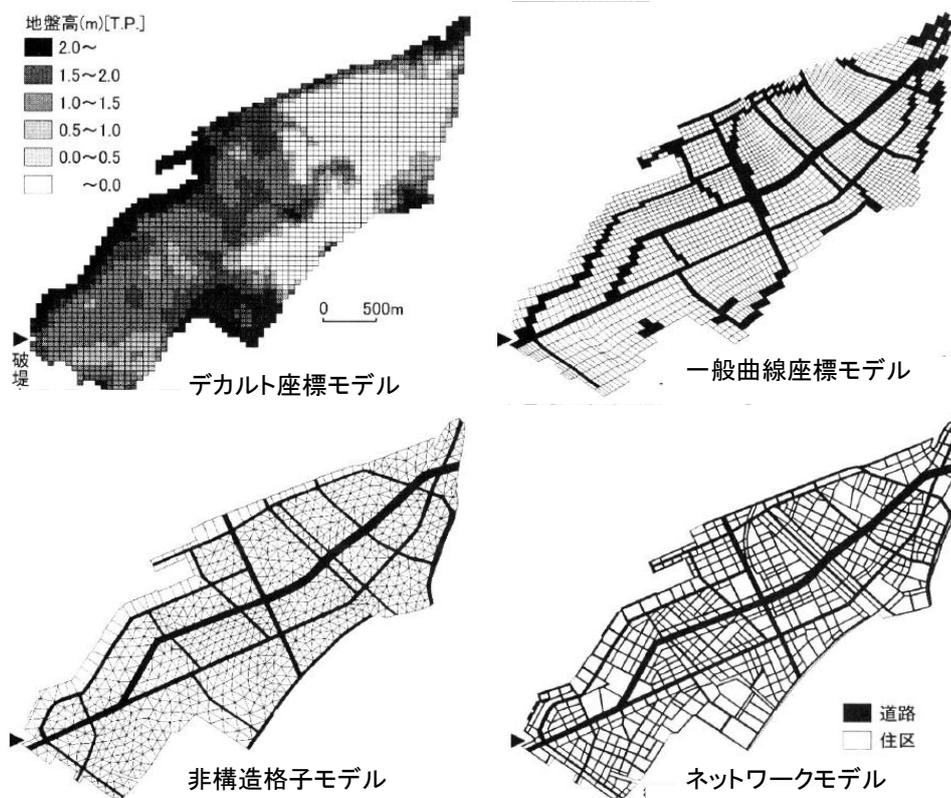


図 4.1 各計算格子の例 (川池ら<sup>1)</sup>)

#### (1) デカルト座標系モデル

解析対象区間を図 4.1 の左上のように長方形のみで構成された格子で解析を行うものである。特徴として最も格子形成が容易であり、簡易的に氾濫の状況を把握するのに適している。一方で建造物による氾濫への影響や道路における詳細な流況を把握することが難しく、相当細かいサイズの格子形成が必要である。

#### (2) 一般曲線座標系モデル(福岡ら(1998<sup>2)</sup>)

主要な道路に沿って座標軸をとることである程度、道路とその他の部分に分けることができる。デカルト座標系に比べて主要な道路に着目した解析ができるが、実際の避難計算を行う際には建物間の細かい通路も対象とすることが望ましいため、ある程度の省略が必要となる。

#### (3) ネットワークモデル

道路網のみを対象としたモデルで細かい通路や空地の網目補完などで避難経路のほとんどの流況を把握することができる。しかし空地の部分に湛水する氾濫水も道路網へ流下するので湛水深を過大評価しやすい

#### (4) 非構造格子

任意形状の格子ブロックに分けることができるため最も自由度の高いメッシュである。建物や道路を分けてモデル化することが容易であるが、一般に格子形成にかなりの労力を有する。

以上のように市街地を対象とした計算格子としては非構造格子が最適である。しかし一般には一般曲線座標モデルが広く使われている傾向<sup>3)</sup>がある。その理由として、格子形成の容易さがあげられる。しかし、本研究ではあくまで市街地の道路網に焦点を当てた氾濫解析を行う必要があるため、非構造格子を使用することとした。

### 4. 3 計算格子の作成

前述のとおり本研究では非構造格子による解析を行うが一般にその格子形成は非常に労力を有する。そこでデンマーク水理研究所（DHI）が開発した MIKE シリーズを使用することとした。その中で非構造格子の形成が可能な MIKE ZERO を使用する。このソフトは任意の座標系における  $x$ ,  $y$  座標及びその地点の標高から成る地形データを読み込むことで任意の範囲を対象に自動で三角形によって構成された非構造格子を作成できる。標高には鹿島市がレーザープロファイルによって測定した直角平面座標系のデータ(図 4.3.1)を使用した。このデータは水平方向、鉛直方向ともにおよそ 1 cm の単位で計測された非常に細かいデータである。ただし、レーザープロファイルの性質上、河川や海ではその水面が標高として観測されてしまうという点やメッシュの作成時に、トンネルや陸橋、家々のひさしなどの物陰も再現できない点に注意が必要である。



図 4.3.1 レーザープロファイルによる地形データ

また、格子の形成に際して、不必要な部分に関してはできるだけ大きい格子を形成した方が安定性や計算機の負荷の面からも望ましく、街区と道路の区別も必要である。そこで街区と道路に格子線が来るように設定を行った。この格子線の位置の参考として国土交通省が公開している「建築物の外周線(図 4.3.2)」、「道路縁(図 4.3.3)」の GIS データを参考にした。



図 4.3.2 建物の外周線を GIS で表示した地図

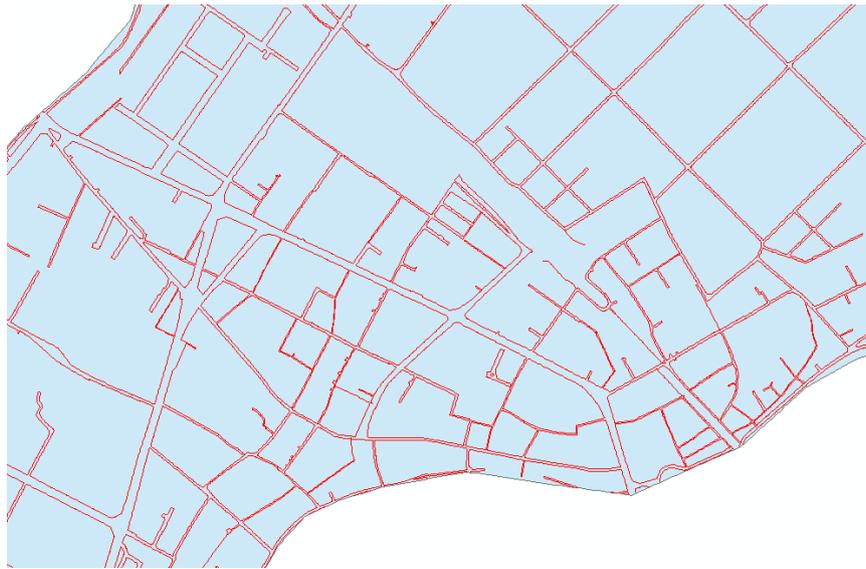


図 4.3.3 道路線

図 4.3.4 に建物の外周線の補助を行わない場合と行わなかった場合の比較を示す。ともに作成範囲は  $2,799,822\text{m}^2$  で、格子の最大面積は  $20\text{m}^2$  として作成している。この最大面積で格子を作成した場合、格子の一边はおよそ  $6\text{m}$  となり、これより大きい隙間は再現されることとなる。これはにより片側一車線の道路幅を再現することができる。補助を行わなかった場合は格子の作成時に再現されない通路があるが、補助を行うことで再現されていることが分かる。補助を行わなかった場合、細い通路は建築物の一部と同等の標高を持つと認識されるため、避難経路における正しい流況が得られず、また、建物以外の部分で水深が過大評価されることとなる。

補助を行わなかった場合の格子数は 216,588 個で補助行った場合の格子数は 218,397 個であった。ちなみにある程度の通路より小さい格子（最大面積  $5\text{m}^2$ ）のみで作成を行うと格子の数はおよそ 87 万個となる。

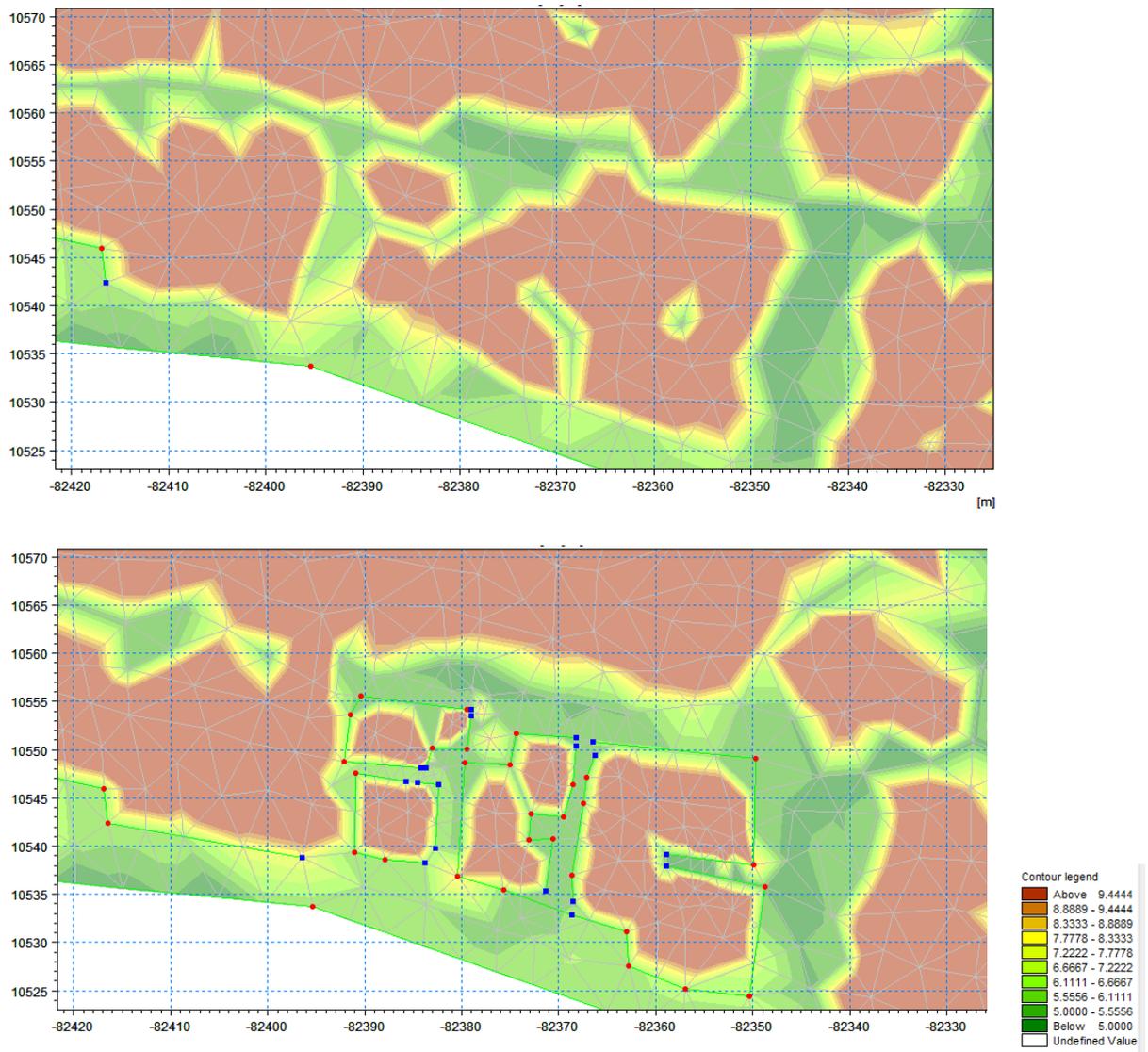


図 4.3.4 建物の外周線の補助を行わない場合(上)と行った場合(下)の比較

#### 4. 4 解析理論

解析には MIKE シリーズの MIKE3<sup>4)</sup>を使用する。このソフトは 3次元解析に特化したソフトである。

本研究で使用される 3次元解析における支配方程式の概要を説明する。

3次元流れ解析は静水圧近似とブシネスク近似に基づく非圧縮性流体に関するレイノルズ方程式を基礎式としている。

連続方程式は以下である。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \quad (4.4.1)$$

ここで  $x,y,z$  はデカルトの座標系,  $u,v,w$  はそれぞれ  $x,y,z$  方向の流速,  $S$  はポイントソースの流量である。

$x, y$  方向の運動方程式は以下である。

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = & -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \\ & + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S \end{aligned} \quad (4.4.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = & -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz \\ & + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S \end{aligned} \quad (4.4.3)$$

ここで  $t$  は時間,  $\eta$  は水表面の標高,  $d$  は水深,  $h=\eta+d$  で全水深,  $g$  は重力加速度,  $\rho$  は水の密度,  $v_t$  は渦動粘性係数,  $P_a$  は大気圧,  $\rho_0$  は水の基準密度,  $S$  はポイントソースの流量で  $u_s, v_s$  はその流速成分である。

本研究ではポイントソースは与えず ( $S=0$ ), 大気圧, 水の密度は空間方向に一定, 圧力はすべて静水圧分布に従うものとし, コリオリの考慮も行わないため式(4.2.2)から式(4.2.4)は以下のようなになる

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.4.4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (4.4.5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (4.4.6)$$

また水平応力の項 $F_u$ ,  $F_v$ は以下のように表わされる.

$$F_u = \frac{\partial}{\partial x} \left( 2A \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad (4.4.7)$$

$$F_v = \frac{\partial}{\partial x} \left( A \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( 2A \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (4.4.8)$$

ここで  $A$  は水平渦動粘性係数で Smagorinsky (1963) モデルを用いて,

$$A = c_s^2 l^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (4.4.9)$$

ここに  $c_s$  は定数,  $l$  は代表長さである. また,  $S_{ij}$  : 変形速度テンソルで以下のようにして与えられる.

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (i, j = 1, 2) \quad (4.4.10)$$

$u, v$  と  $w$  における表面及び底部の境界条件は以下のものである.

$z=\eta$  (水表面) :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} - w = 0, \quad \left( \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_0 v_t} (\tau_{sx}, \tau_{sy}) \quad (4.4.11)$$

$z=-d$  (底部) :

$$u \frac{\partial d}{\partial x} + v \frac{\partial d}{\partial y} + w = 0, \left( \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_0 v_t} (\tau_{bx}, \tau_{by}) \quad (4.4.12)$$

ここで  $\tau_{sx}, \tau_{sy}$  と  $\tau_{bx}, \tau_{by}$  はそれぞれ各方向の水表面及び水底におけるせん断応力である。  $v_t$  は鉛直方向の渦動粘性係数で  $k$ - $\varepsilon$  モデルによって考慮すると

$$v_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.4.13)$$

ここで  $k$  は単位質量あたりの乱流運動エネルギー (TKE),  $\varepsilon$  は散逸率,  $c_\mu$  は実験定数で 0.09 を与えた。

この式の  $k$  および  $\varepsilon$  は以下の輸送方程式から得られる。

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial uk}{\partial x} + \frac{\partial vk}{\partial y} + \frac{\partial wk}{\partial z} = F_k + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + P + B - \varepsilon \quad (4.4.14)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial u\varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial v\varepsilon}{\partial y} + \frac{\partial w\varepsilon}{\partial z} = F_\varepsilon + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (c_{1\varepsilon} P + c_{3\varepsilon} B - c_{2\varepsilon} \varepsilon) \quad (4.4.15)$$

ここで,  $P$  はせん断力,  $B$  は浮力で, 以下のように与えられる。

$$P = \frac{\tau_{xz}}{\rho_0} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\tau_{yz}}{\rho_0} \frac{\partial v}{\partial z} \approx v_t \left( \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right) \quad (4.4.16)$$

$$B = -\frac{v_t}{\sigma_t} N^2 \quad (4.4.17)$$

ここで  $N$  は Brunt-Väisälä 振動数で

$$N^2 = -\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (4.4.18)$$

と定義される。  $\sigma_t$  は乱流プラントル数で,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ ,  $c_{1\varepsilon} = 1.44$ ,  $c_{2\varepsilon} = 1.92$ ,  $c_{3\varepsilon} = 0$  は

実験定数である。F は水平拡散項で

$$(F_k, F_\varepsilon) = \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (k, \varepsilon) \quad (4.4.19)$$

D は水平拡散係数で、 $D_h = A/\sigma_k$ 、 $D_h = A/\sigma_\varepsilon$ でそれぞれ与えられる。

乱流運動エネルギーのための境界条件とその拡散量は水表面では以下の式が用いられる。

$$k = \frac{1}{\sqrt{c_\mu}} U_{\tau s}^2 \quad \varepsilon = \frac{U_{\tau s}^3}{\kappa \Delta z_b} \quad (4.4.20)$$

ここに、 $\kappa=0.4$ ：カルマン定数、 $a=0.07$ ：実験定数、 $U_{\tau s}$ ：風応力である。また、底面では

$$k = \frac{1}{\sqrt{c_\mu}} U_{\tau d}^2, \quad \varepsilon = \frac{U_{\tau d}^3}{\kappa \Delta z_b} \quad (4.4.21)$$

ここで  $\Delta z_b$  は境界条件を与えた底面からの距離、 $U_{\tau d}$  は底部の摩擦速度である。

底面せん断応力  $\tau_b = (\tau_{bx}, \tau_{by})$  は 2 次の摩擦則によって決定される。

$$\frac{\tau_b}{\rho_0} = c_f \vec{u}_b |\vec{u}_b| \quad (4.4.22)$$

ここで、 $c_f$  は抵抗係数、 $\vec{u}_b = (u_b, v_b)$  は底面から  $\Delta z_b$  地点の流速である。摩擦速度は以下の式によって底面応力と関連付けて与えられる。

$$U_{\tau b} = \sqrt{c_f |\vec{u}_b|^2} \quad (4.4.23)$$

抵抗係数は底面と底面付近の点  $z_b$  の間の対数側によって決まる。

$$C_f = \frac{g}{\left( \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{\Delta z_b}{z_0} \right) \right)^2} \quad (4.4.24)$$

ここで  $\kappa=0.4$ ：カルマンの定数、 $z_0$  粗度高さである。境界表面が粗いとき、 $z_0$  は粗度高さ  $k_s$  に依存する。

$$z_0 = mk_s \quad (4.4.25)$$

$$m \approx 1/30 \quad (4.4.26)$$

また、マニングの粗度係数は河床粗度高さを用いた以下の式から算出される。

$$M = \frac{25.4}{k_s^{1/6}} \quad (4.4.27)$$

氷におおわれていない水表面の応力  $\tau_s=(\tau_{sx}, \tau_{sy})$  は表面の風応力によって決まる。この応力は以下の実験則により求める。

$$\vec{\tau}_s = \rho_a c_d |u_w| \vec{u}_w \quad (4.4.28)$$

ここで  $\rho_a$  は空気の密度,  $c_d$  空気による抵抗係数,  $\vec{u}_w = (u_w, v_w)$  は水面から 10m 上の風速である。摩擦速度は以下の式によって表面応力と関連付けて与えられる。

$$U_{\tau_s} = \sqrt{\frac{\rho_a c_f |\vec{u}_w|^2}{\rho_0}} \quad (4.4.29)$$

抵抗係数は Wu(1980, 1994)<sup>5),6)</sup>らによる実験則から一定値もしくは風速によって決まる。

$$c_f = \begin{cases} c_a & w_{10} < w_a \\ c_a + \frac{(c_b - c_a)}{(w_b - w_a)} (w_{10} - w_a) & w_a \leq w_{10} < w_b \\ c_b & w_{10} \geq w_b \end{cases} \quad (4.4.30)$$

ここで  $c_a = 1.255 * 10^{-3}$ ,  $c_b = 2.425 * 10^{-3}$ ,  $w_a = 7m/s$ ,  $w_b = 25m/s$  は実験により求められた値で  $w_{10}$  は水面から 10 上における風速である。

MIKE3 による 3 次元流れ解析では有限体積法を用いて離散化が行われる。水平領域では非構造格子を用いているが、鉛直領域には構造格子を用いている (図 4.4.1)。鉛直領域ではシグマ座標系をベースとしている。シグマ座標系の鉛直方向の格子イメージを図 4.4.2 に示す。本研究では鉛直格子にシグマ座標系で定義された均一な層を 2 層与えた。

シグマ座標系について、この座標系における最大の特徴は標高を正確に再現できること、また、底面付近で一貫性の解法を提供できることである。しかしながら、シグマ座標系は急峻 (急勾配) な地形変化を伴う領域内で水平圧力勾配や移流でエラーを被る。その際には非現実

的な流れとなるため，地形再現や条件の与え方に注意が必要である。

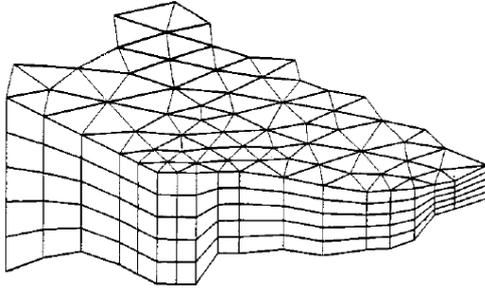


図 4.4.1 計算格子<sup>4)</sup>

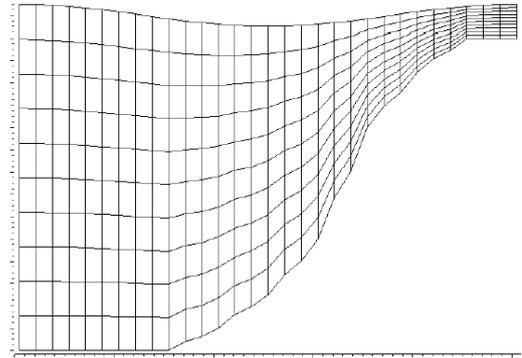


図 4.4.2 計算格子<sup>4)</sup> (鉛直方向)

シグマ座標で計算する場合，デカルト座標系は以下のように変換される。

$$\sigma = \frac{z-z_b}{h}, \quad x' = x, \quad y' = y \quad (4.4.31)$$

ここに， $\sigma$ ：底面 0 から水面 1 の間の変数で $z_b$ は格子点の平均水深である．この座標変換は以下のような関係がある．

$$\frac{\partial}{\partial z} = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial \sigma} \quad (4.4.32)$$

$$\left( \frac{\partial}{\partial x'} \frac{\partial}{\partial y'} \right) = \left( \frac{\partial}{\partial x'} - \frac{1}{h} \left( -\frac{\partial d}{\partial x} + \sigma \frac{\partial h}{\partial x} \right) \frac{\partial}{\partial \sigma}, \frac{\partial}{\partial y'} - \frac{1}{h} \left( -\frac{\partial d}{\partial y} + \sigma \frac{\partial h}{\partial y} \right) \frac{\partial}{\partial \sigma} \right) \quad (4.4.33)$$

ここで $\eta$ は水表面の標高， $d$ は水深， $h=\eta+d$ で全水深である．シグマ座標系を基礎式等に適用すると以下のように変換される．

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x'} + \frac{\partial hv}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega}{\partial \sigma} = 0 \quad (4.4.34)$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x'} + \frac{\partial hvu}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega u}{\partial \sigma} = -gh \frac{\partial \eta}{\partial x'} + hF_u + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{v_v}{h} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) \quad (4.4.35)$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x'} + \frac{\partial hv^2}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega v}{\partial \sigma} = -gh \frac{\partial \eta}{\partial y'} + hF_v + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{v_v}{h} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) \quad (4.4.36)$$

$$\frac{\partial h k}{\partial t} + \frac{\partial h u k}{\partial x'} + \frac{\partial h v k}{\partial y'} + \frac{\partial h \omega k}{\partial \sigma} = h F_k + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( v_t \frac{\partial k}{\partial \sigma} \right) + h(P + B - \varepsilon) \quad (4.4.37)$$

$$\frac{\partial h \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial h u \varepsilon}{\partial x'} + \frac{\partial h v \varepsilon}{\partial y'} + \frac{\partial h \omega \varepsilon}{\partial \sigma} = h F_\varepsilon + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( v_t \frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma} \right) + h \frac{\varepsilon}{k} (c_{1\varepsilon} P + c_3) \quad (4.4.38)$$

ここに  $\omega$  は鉛直流速で以下の式によって定義される。

$$\omega = \frac{1}{h} \left[ w + u \frac{\partial d}{\partial x'} + v \frac{\partial d}{\partial y'} - \sigma \left( \frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x'} + v \frac{\partial h}{\partial y'} \right) \right] \quad (4.4.39)$$

水平拡散項は以下のように定義される。

$$h F_u \approx \frac{\partial}{\partial x} \left( 2hA \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( hA \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad (4.4.40)$$

$$h F_v \approx \frac{\partial}{\partial x} \left( hA \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( 2hA \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (4.4.41)$$

$$h(F_k, F_\varepsilon) \approx \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( hD_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( hD_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (k, \varepsilon) \quad (4.4.42)$$

自由表面と底面の境界条件は以下のように与えられる。水表面  $\sigma = 1$  のとき、

$$\omega = 0, \quad \left( \frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) = \frac{h}{\rho_0 v_t} (\tau_{sx}, \tau_{sy}) \quad (4.4.43)$$

底部  $\sigma = 0$  のとき

$$\omega = 0, \quad \left( \frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) = \frac{h}{\rho_0 v_t} (\tau_{bx}, \tau_{by}) \quad (4.4.44)$$

となる。

#### 4. 5 氾濫解析への適用の諸条件

ここでは前節までに述べた格子形成及び計算方法をもとに実際に鹿島市浜地区を対象とした氾濫解析を行う。この地区では2章で述べたように過去に大きな洪水氾濫が起こっており大きな被害を出している。その時の情報は鹿島市災害史<sup>7)</sup>や松岡<sup>8)</sup>による聞き取り調査の資料がある。

1962年7月8日における雨量は鹿島市災害史から図4.5.1のようになっている。

この時の最大時間雨量は72mm、累計雨量は289mmとなっている。本研究における氾濫解析において雨の条件はこの時間雨量を基に作成した。

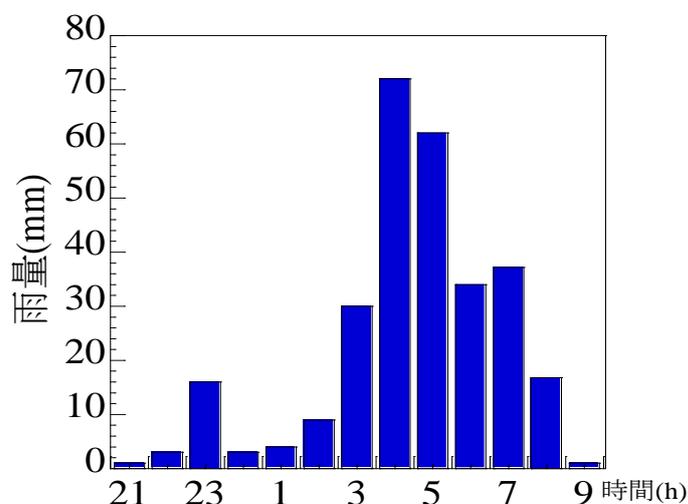


図4.5.1 1962年7月7日から8日の時間雨量<sup>5)</sup>

当時の氾濫は浜川に架かる薬師橋に流木が滞留し、それが原因でせき上げが起こり堤内地へ侵入したことが原因だった。この時の詳細な情報は記録として残っていないが松岡<sup>6)</sup>の災害時からの住民を対象とした聞き取り調査から「越流時間はおよそ1時間」で「最大越流水深は約45cmであった」ことが分かった。この情報を参考に図4.5.3の様な時間ごとの越流水深を決定した。さらに、これらの数値を越流公式(式4.5.1)によって流量に換算した(図4.5.3)。

$$q = KH^{3/2} \quad (4.5.1)$$

ここで $q$ は単位幅流量、 $H$ は越流水深、 $K$ は越流係数でありGovinda Rao<sup>9)</sup>の実験を参考に $K=1.55$ とした。これに越流幅175mを乗じたものを当時の越流量とする。

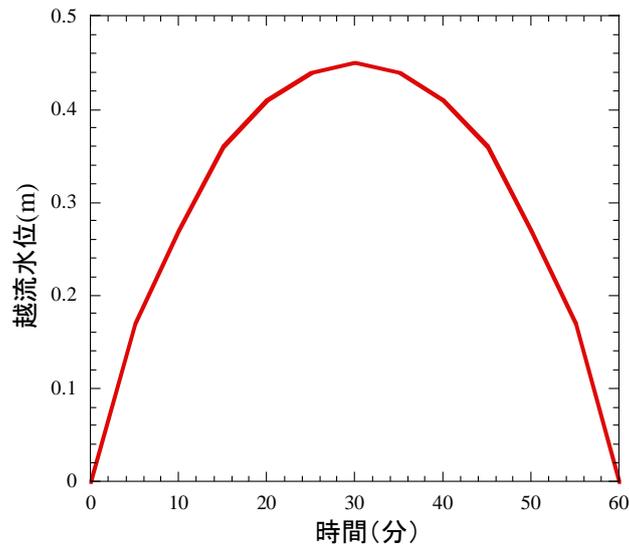


図 4.5.2 越流水深の時間変化

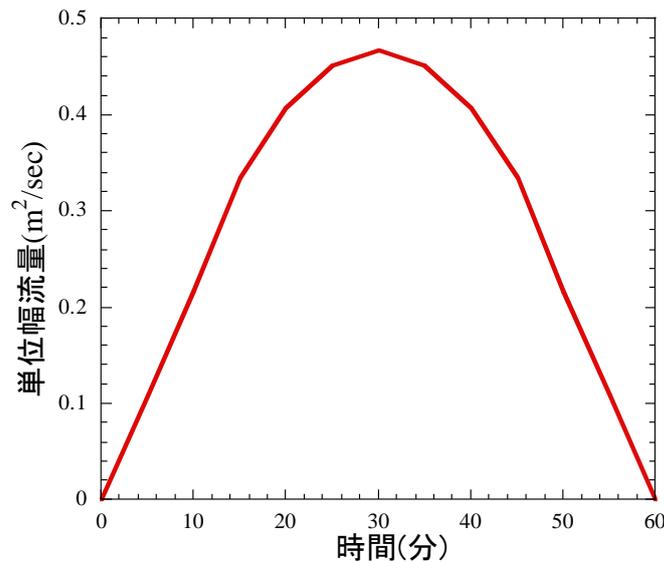


図 4.5.3 単位幅あたりの越流量の時間変化

ところで、この地区は第2章で述べたとおり過去に幾度も洪水被害を被っており、その中でも特に被害の大きい災害が1962年及び1976年に起こっており、その後作成された浜川水系河川整備基本方針<sup>10)</sup>には以下の記載がある。

「浜川の治水事業は、河口の高潮対策事業およびその上流の広域基幹河川改修事業がある。平成2年に認可された高潮対策事業は、河口から浜橋地点までの670m区間について、拡幅およ

び護岸の整備を進めている。広域基幹河川改修事業（浜川については、昭和 56 年に旧中小河川改修事業により認可）については、浜橋地点から上古枝橋地点までの区間の 3,330m の整備であり、まだほとんどの区間が未改修である。」

なおこの資料は平成 15 年に作成されたもので更新はされていない。また現在では 2 度の洪水被害を受けて河川改修が行われており 50 年に一度の降雨で発生すると予測される  $280\text{m}^3/\text{s}^7$  を基本高水のピーク流量とした改修がなされている。

このように河川改修などによって当時と現代では河道の形状が異なり当時の河道の流況を再現して現代の地形では再現が行えない。そこで本研究における氾濫解析の流入流量の条件は図 4.5.3 を基本として作成する。また、同様に浜川からの流入箇所を変えることで浸水範囲や避難形態がどのように変化するかを同じ流量で比較するために氾濫解析の流入量も同じものを使用する。さらに現在ではこの地区では鹿島市作成の洪水ハザードマップが公開されている（図 3.5.4）。このハザードマップでは 50 年に 1 度の雨を想定しており、前述のとおり浜川は氾濫せず、石木津川の氾濫が想定されている。そこで他のケースと同様の流量を浜地区北部を流れる石木津川から侵入させるケースも行った。



また、高潮対策としての堤防の効果の確認や高潮時の避難解析を行うために Torry(1012)<sup>12)</sup>による有明海を対象として行った 2004 年伊勢湾台風時の流況を再現した高潮解析の計算結果を参照した高潮氾濫の浸水域も求めた。

Torry(1012)<sup>12)</sup>の行った解析の条件を示す。

- ・ 期間

2004 年 9 月 6 日 21 時～8 日 3 時（平成 16 年台風 18 号，国際名：Songda）

- ・ 水質条件

水温：19.0℃

塩分濃度：32.5PSU

- ・ 初期条件

日本海洋データセンター<sup>13)</sup>からデータを入手し，内部補完を行った水位（図 3.5.5）。

- ・ 境界条件

雨量，風速，風向に関しては気象庁<sup>14)</sup>から入手したものを使用。

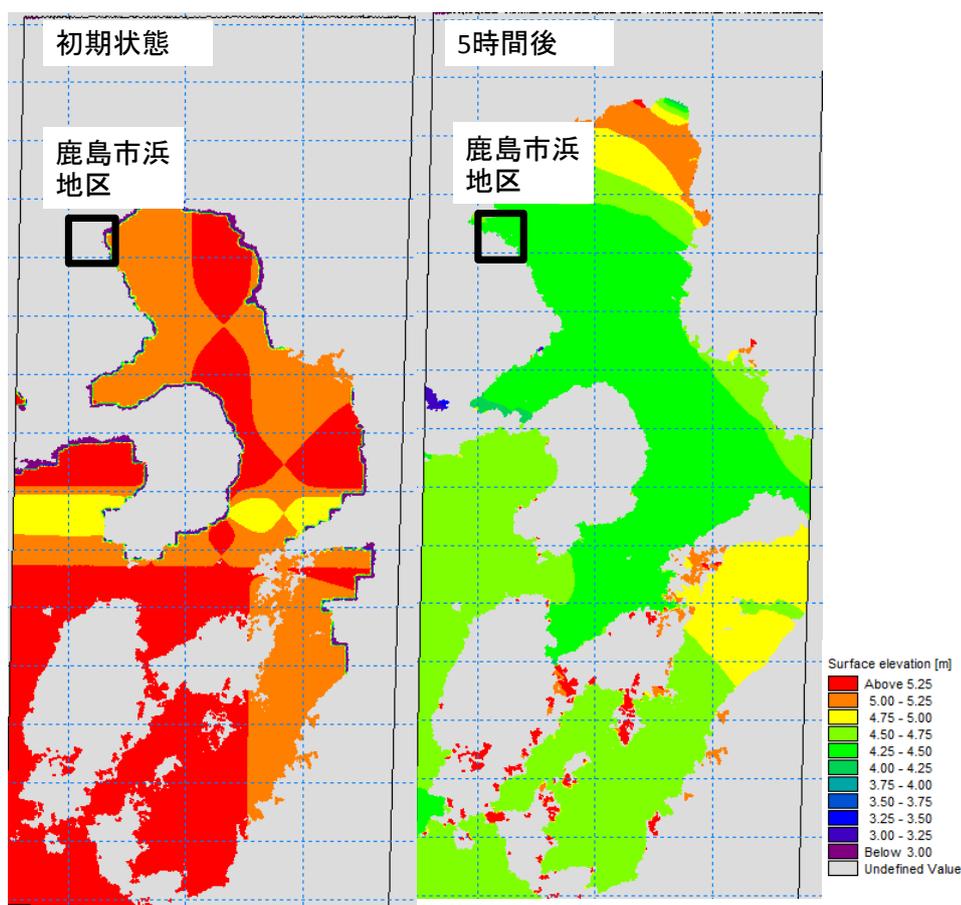


図 4.5.5 高潮解析の初期条件と 5 時間後の水位

計算 CASE をまとめると以下ようになる。

CASE1：浜川の国道 207 号線付近からの流入

CASE2：CASE1 より少し上流の避難所の背後から流入

CASE3：さらに上流からの流入

CASE4：さらに上流から流したケースで 1962 年水害と同じ個所からの流入

CASE5：ハザードマップに準じた石木津川からの氾濫

CASE6：高潮による氾濫

各ケースの流入位置を図 4.5.6 に示す。

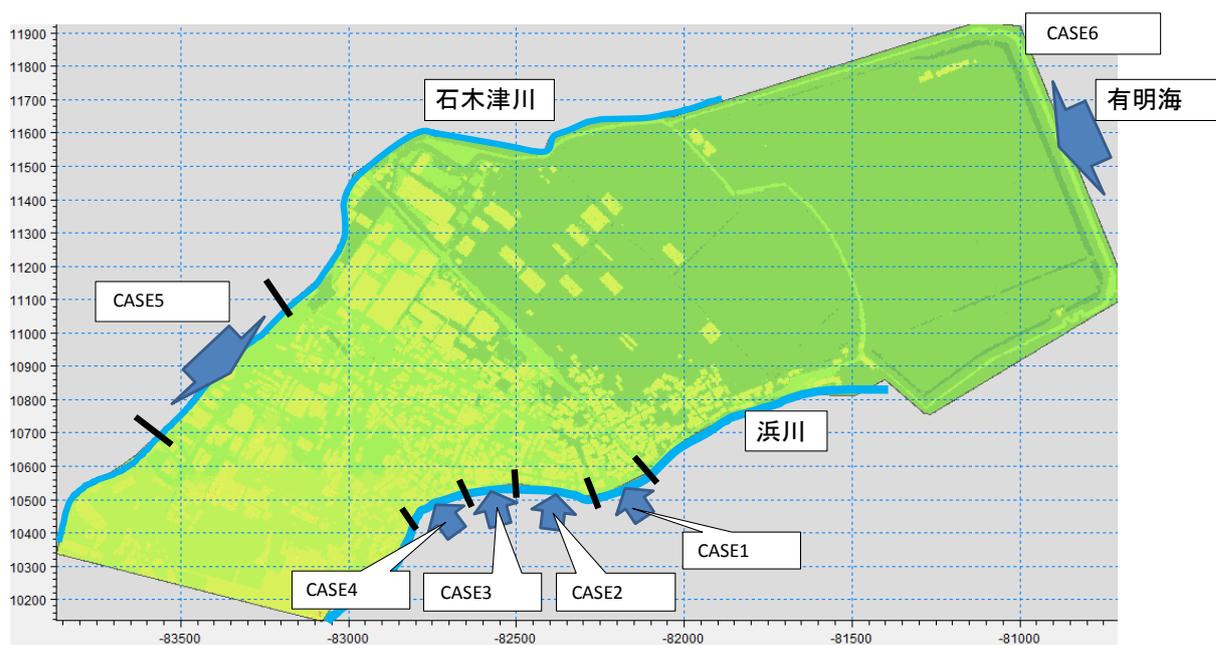


図 4.5.6 各ケースの流入箇所

図 3.5.7 に鹿島市が作成したレーザプロファイラデータから建物や樹木を取り除いたものを示す。このように有明海方面に緩やかな勾配を有しており、域内の水は概ね東流する。また域内中央に周囲より比較的高い（標高 6m ほど）箇所がある。これは JR の肥前浜駅がある個所でそこから南西に高い道があり、相対的にその道の脇は標高が低くなっており、滞留が起きやすくなると予測される。

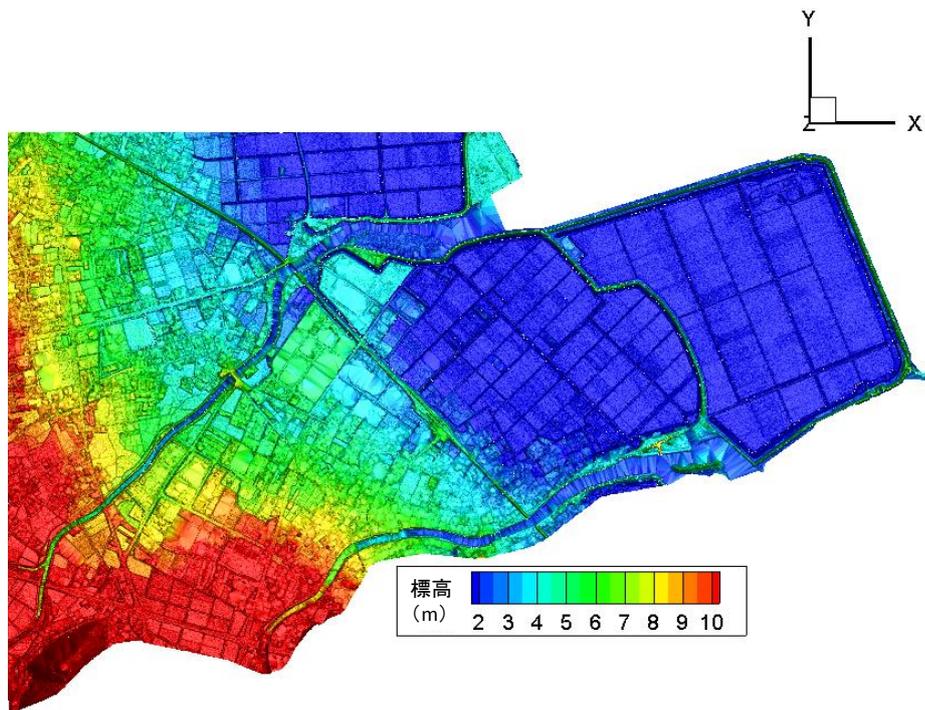


図 4.5.7 域内における標高

#### 4. 6 氾濫解析の結果

ここでは各ケースの時々刻々の湛水状況を以下に示す。その際、図 4.6.1 に示すような箇所を基準として結果の様子を述べるものとする。

赤い三角系の目印は鹿島市が指定する避難所を指し、①は浜小学校、②はJA さが浜町支店で避難所となっている。一般に小学校の方が収容人数が多くこちらへ避難する。③はJR の肥前浜駅でこの位置から南西へ伸びる道路は周囲に比べ標高が高くなっている。④は工場となっていて比較的標高が高い。⑤には浜川に架かる薬師橋がある。1962 年水害においてこの橋に流木が滞留し、越流氾濫が起こった。

A を結ぶ緑線は国道 207 号線である。2 つの避難所に挟まれ、幅が広く周囲の視界も良く歩きやすいため避難時は多くの避難者が通ると推測される。

B を結ぶ緑線は JR 長崎線である。JR 長崎線は盛土上を走っており、この盛土から国道 207 号線までの間の区間は標高が周囲より低く、滞留が起こりやすい。

B を結ぶ線上にある C には盛土の下を通るトンネルがある。

ここでは B 線より北東部の低地を北部、南西部を南部と簡略化して呼称する。

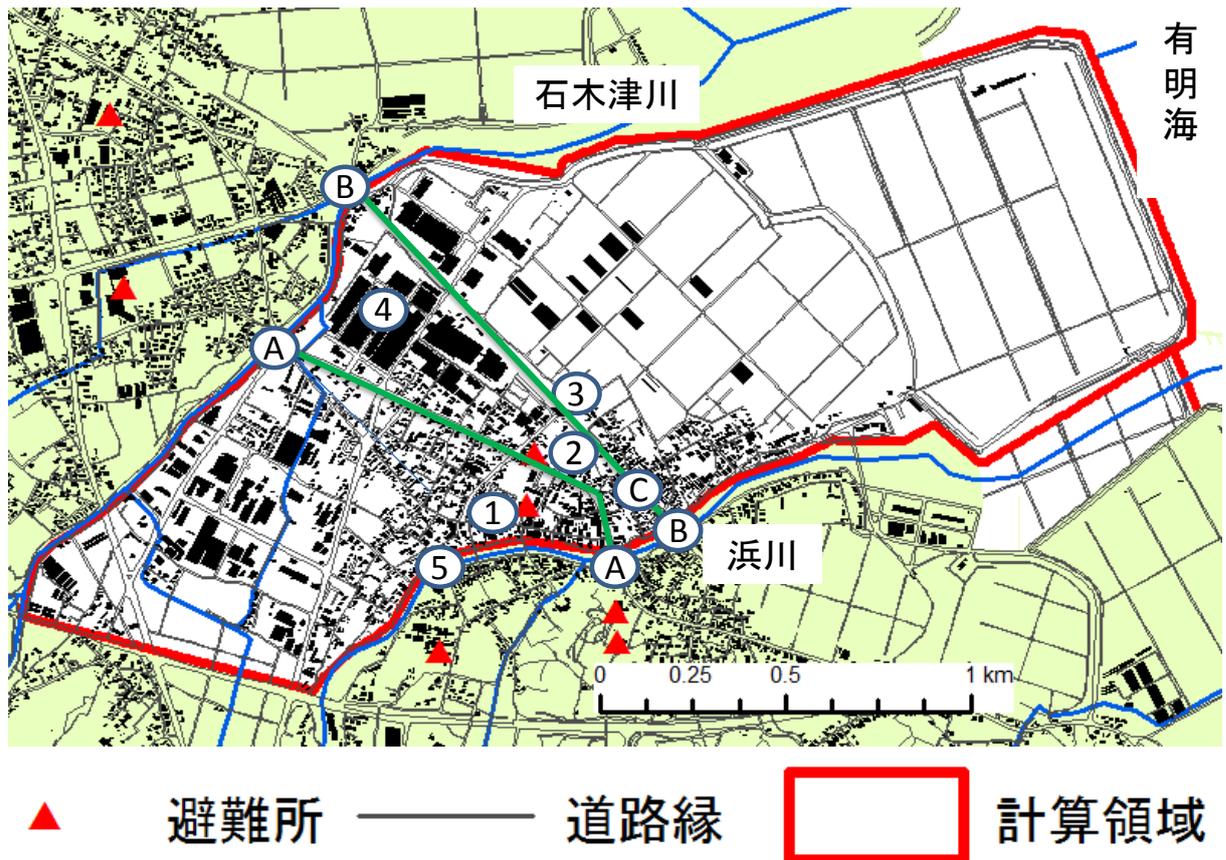


図 4.6.1 域内の要所の位置

(1) CASE1

このケースでは避難経路のなかでも最大の幅員を持つ道路の一つである国道207号線のすぐそばから氾濫水が流入している(図4.6.2)。氾濫開始15分で避難所より北側の範囲は最大で1m近く浸水し、30分後には2mに達している、この後もこの国道を流路として氾濫水は広がっていき最終的に1m前後の水深に落ち着く。また、駅周辺は標高の起伏が激しく、特に盛土の南側で深い浸水深となる個所がある。また、氾濫水は主に浜川沿いと浜駅周辺から北部へ伝播し、北部の方ではほぼ全域に氾濫水が広がった。

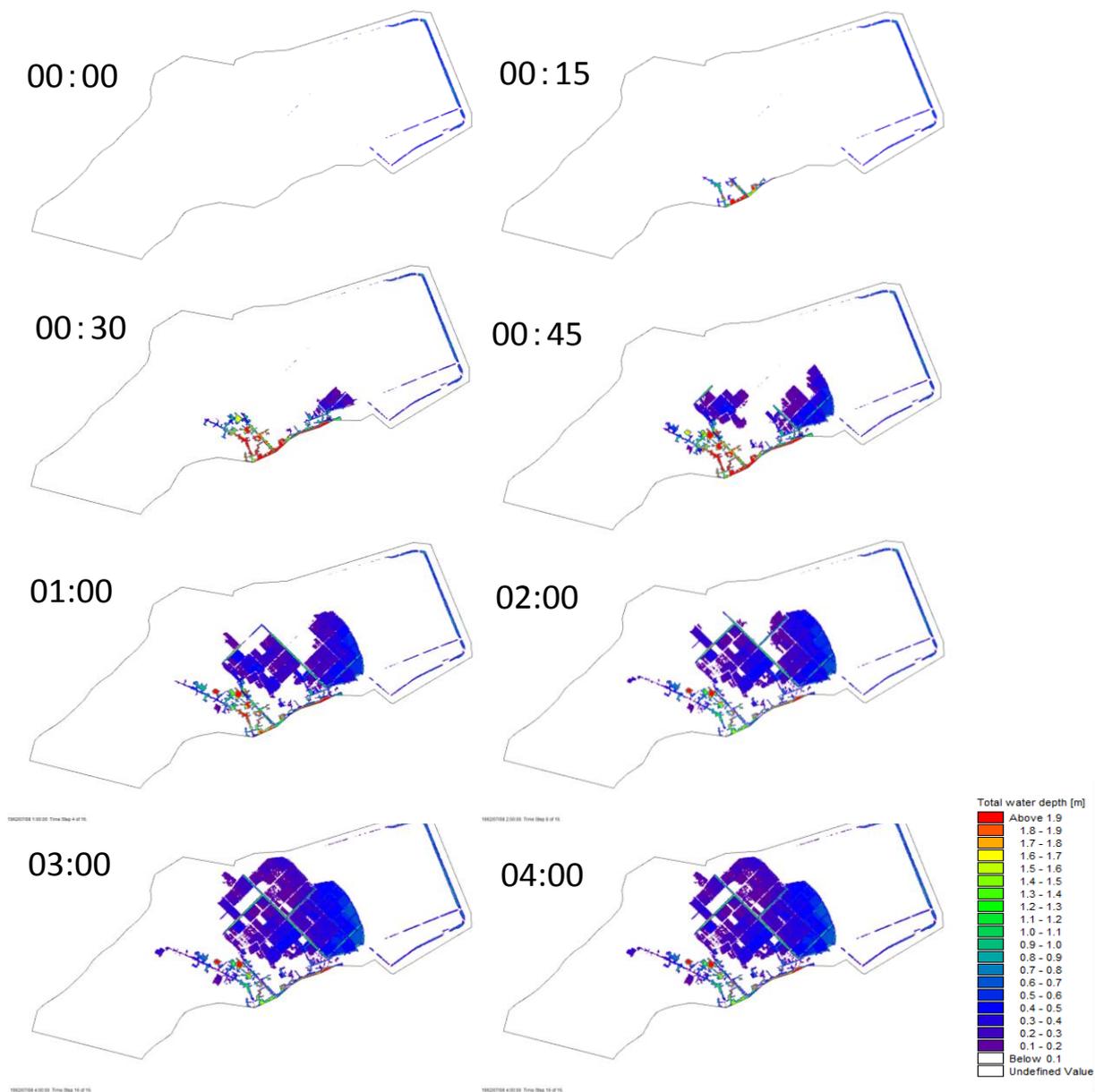


図 4.6.2 CASE1 解析結果

図 4.6.3 に図 4.6.1 に示す A-A 線である国道 207 号線を南から北へ向かった方向の浸水状況を示す。氾濫水は 400m の距離をおよそ 15 分で進んだことが分かる。また避難所の位置を見ると 30 分後に急激に上昇をはじめ、80 cm に近い浸水となった。この湛水状況では歩行による避難行えない。そのため国道 207 号線を通り避難所に到達することは不可能であろう。したがってこのような状況では堤防より南部地域の住民でも東部からの避難は困難なため早期の避難開始が必要である。

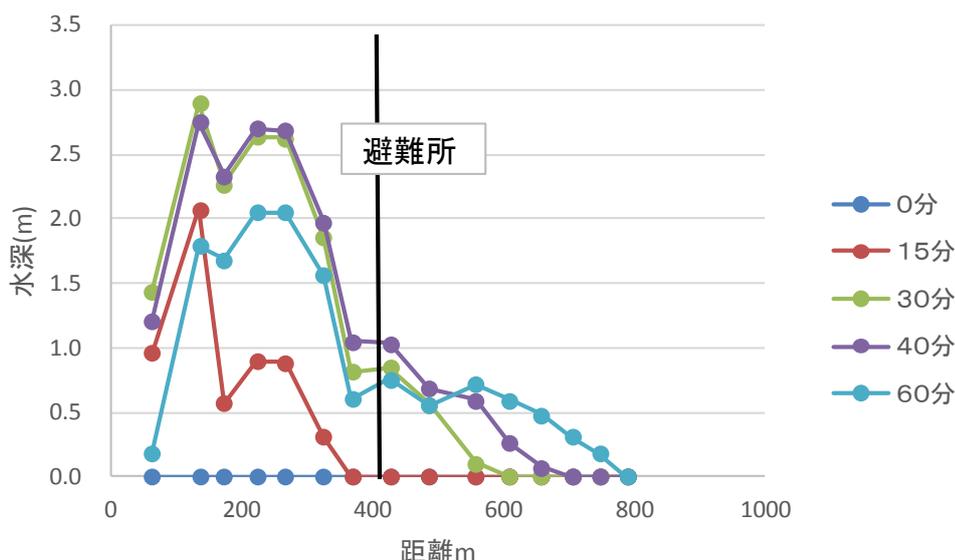


図 4.6.3 CASE1 国道 207 号線の浸水状況

## (2) CASE2

図 4.6.4 に CASE2 の結果を示す。このケースでは避難所となる浜小学校のすぐ南から流入している。結果はほぼ CASE1 と同じ挙動を示した。その理由として、浜川沿いの道が北部へ向けて広い流路となっており、国道 207 号線と合流するためである。

## (3) CASE3

図 4.6.5 に CASE3 の結果を示す。このケースでは CASE2 よりさらに上流からの流入を行った。このケースでは避難所東部に多くの氾濫水が滞留した。そのため、北部への流入が少なくなっている。しかしこのケースでも避難所周辺の通路は 1m 前後、駅周辺は 2m の湛水深を有しており、これまでのケースと併せて考えても東部の住民や駅周辺の住民は早期避難を徹底する必要があるだろう。

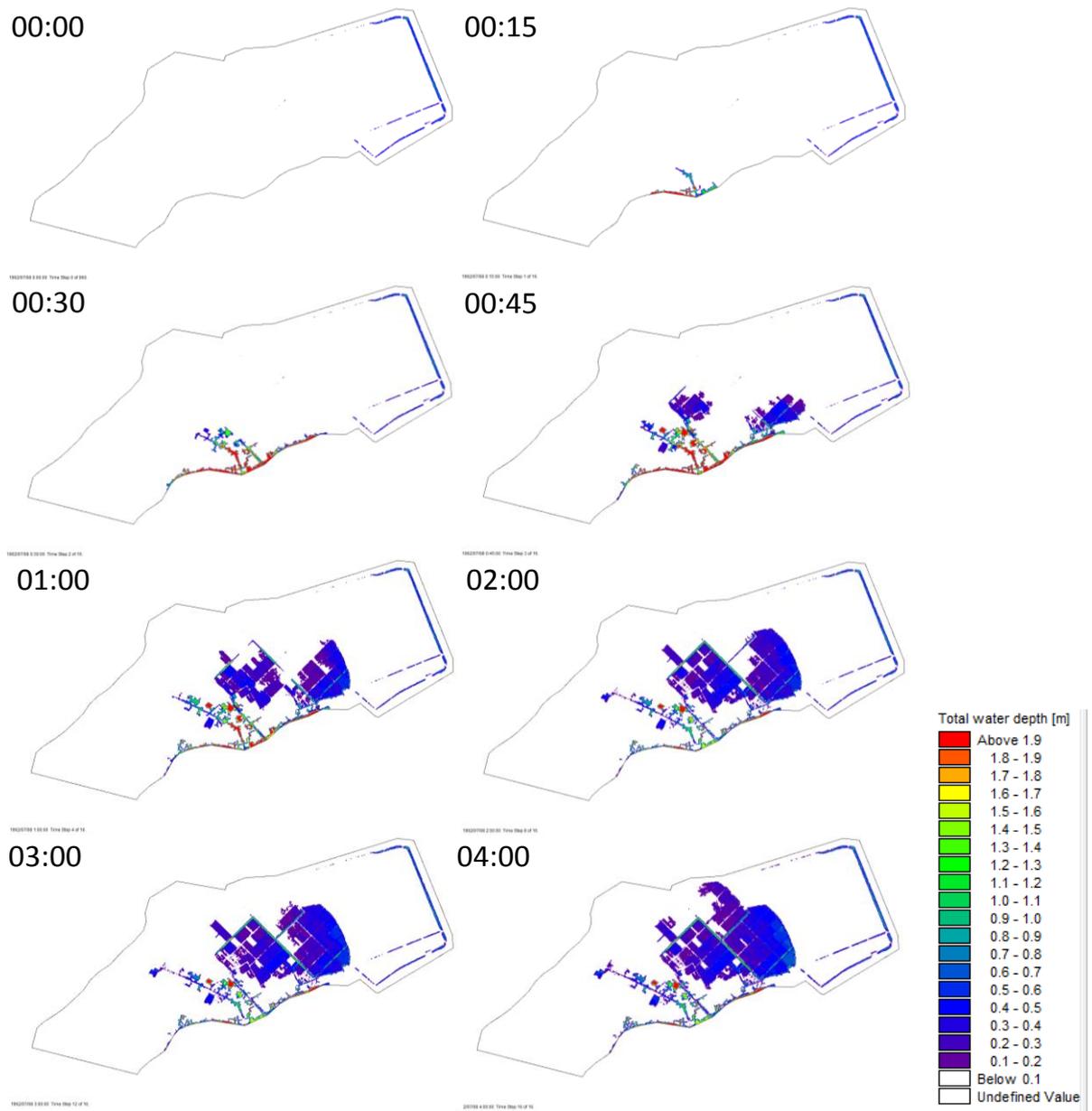


图 4.6.4 CASE2 氾濫解析結果

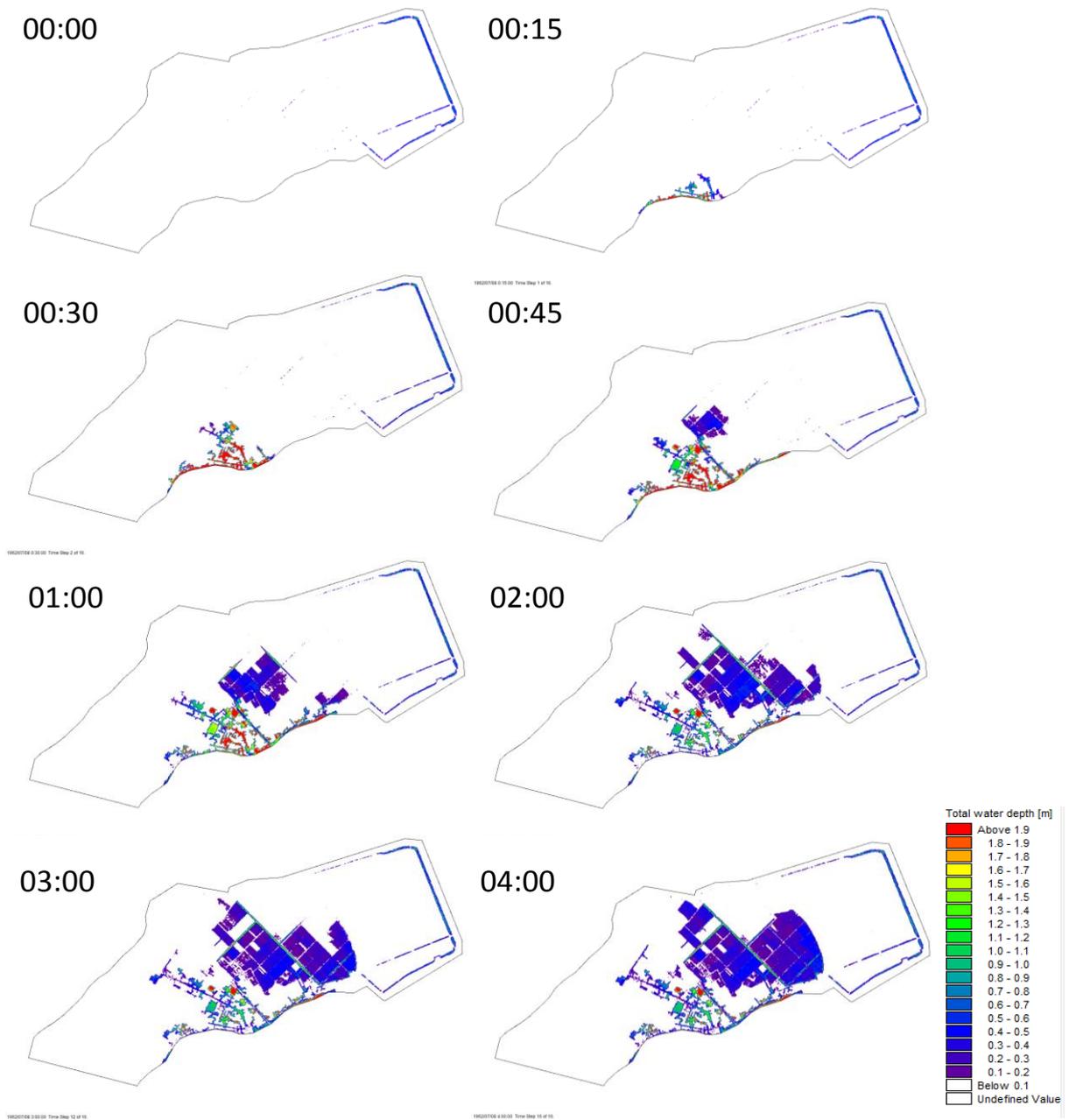


图 4.6.5 CASE3 氾濫解析結果

(4) CASE4

図 4.6.6 に CASE4 の氾濫解析結果を示す。このケースは 1962 年に起きた水害を松岡らによる聞き取り調査<sup>6)</sup>から得た情報を基に再現したものである。ほかのケースに比べ南部で広範囲に氾濫水が広がっている。このケースでは他のケースに比べて浸水面積が広い分、やや水深が低くなっている。

最終的な湛水状況を図 4.2.7 に、聞き取り調査による主な水深を図 4.2.8 に示した。解析では西部の石木津川付近まで水が至らなかった。当時と比べると建築物が増え氾濫水の流れが滞った可能性がある。その他の 2m 以上観測地点、1m 以上の観測地点については凡その分布が再現された。これらの水深は盛土の標高に影響されたものでありこれ以上の水にはなりにくいと思われる。

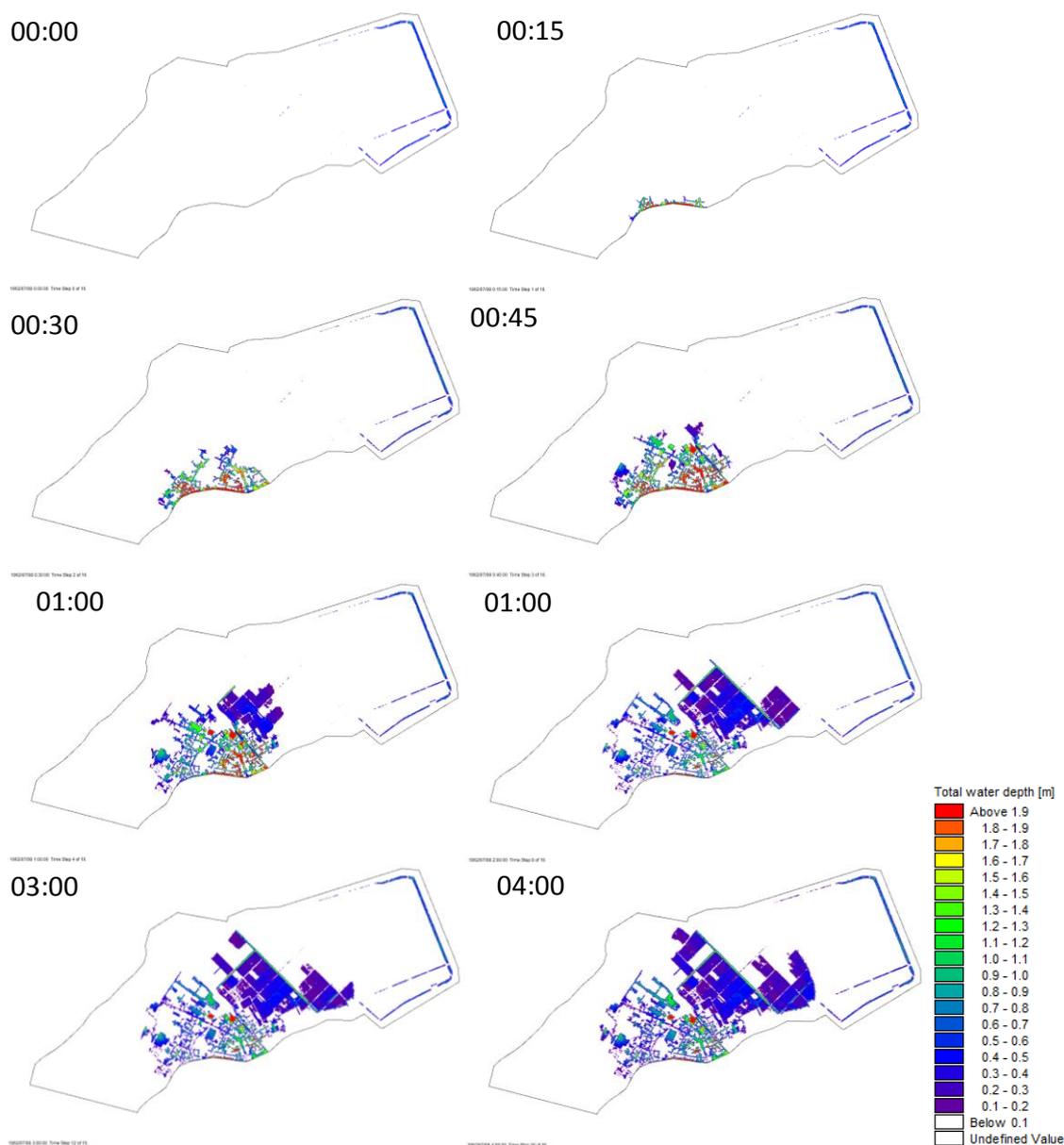


図 4.6.6 CASE4 氾濫解析結果

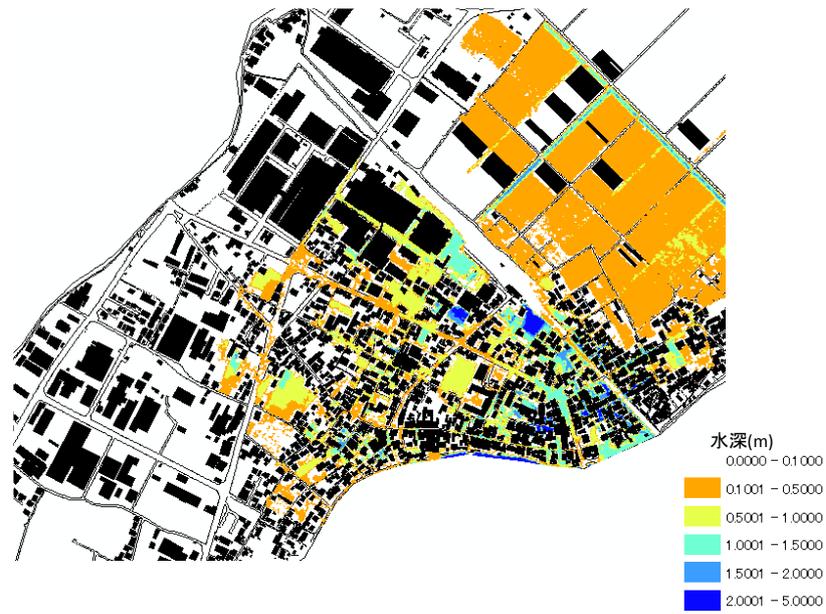


図 4.6.7 CASE4 氾濫解析結果(GIS)

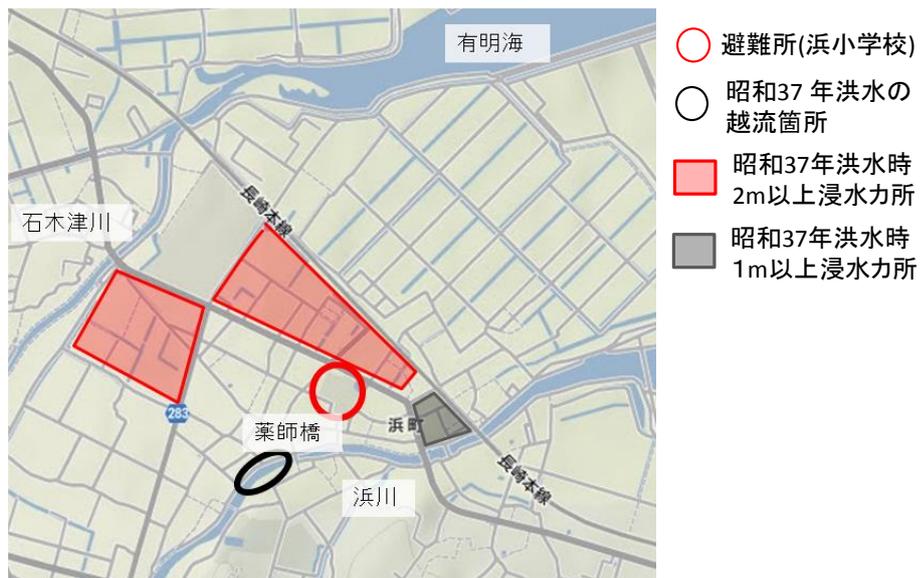


図 4.6.8 聞き取り調査による 1962 年 7 月洪水の湛水深

(5) CASE5

このケースは鹿島市のハザードマップ（図 4.5.4）を参考に石木津川から流入させたものである。流入箇所は国道 207 号線に乗せる橋から上流へ 400m の範囲とした。浜川からの流入同様、国道 207 号線を伝っている様子が見て取れる。東側の駅周辺で高い水深を有している点も浜川からの流入時と同様である。また今回は石木津川沿いに大量の水が伝っている様子が見て取れる。この北西端の湛水深が高い箇所は図 3.610 に示すような周囲より標高が低く、遊水地のような役割を果たす畑がある場所である。

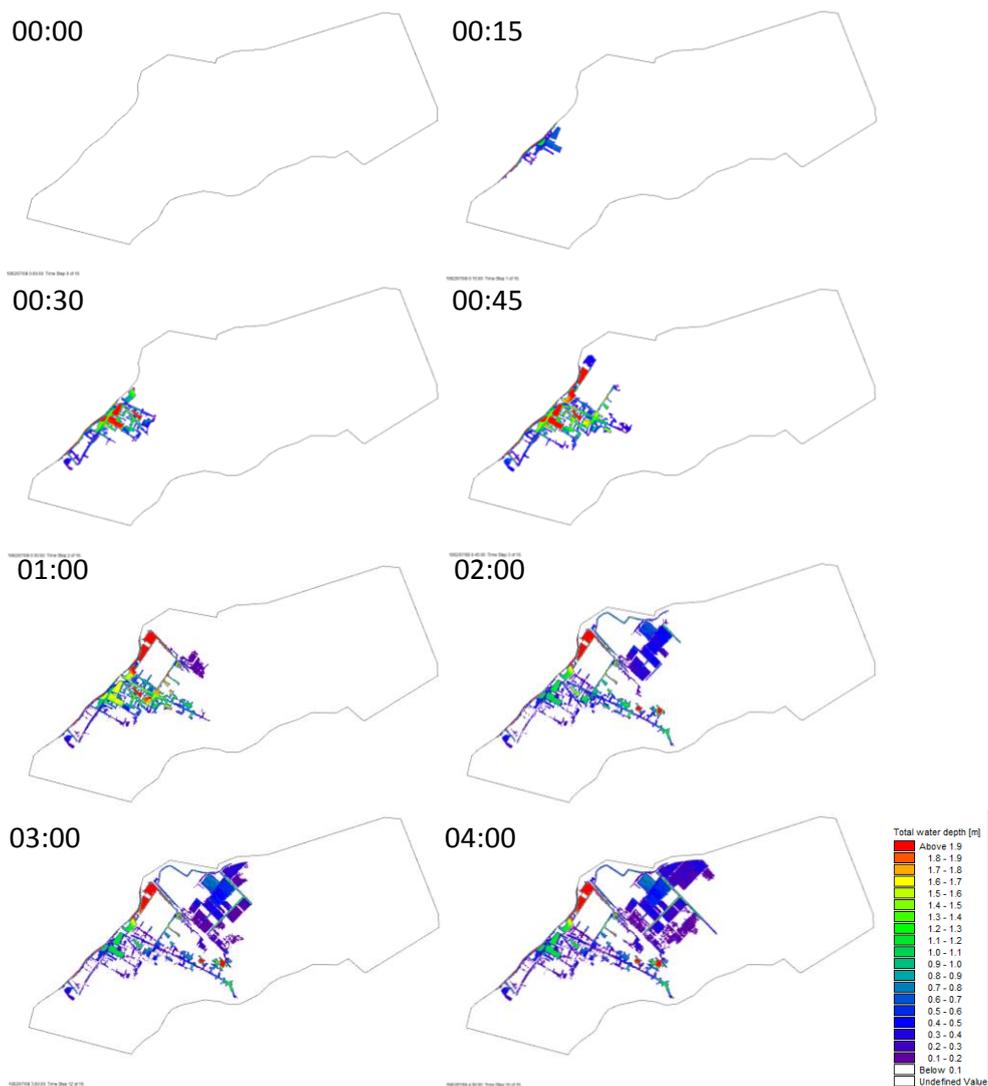


図 4.6.9 CASE4 氾濫解析結果



図 4.6.10 北西部の低地の様子

(6) CASE6

このケースは Torry<sup>12)</sup>による高潮解析に浜地区のみ詳細な標高データ与え、他のケースと同等の格子で解析を行った結果である。この結果から北部地域のほぼ全域で 2m 以上の水深となった。また図 4.6.11 に黒丸で示した箇所は工場や倉庫が立ち並ぶ区画だが標高が比較的高く水深 70 cm程にとどまっている。一方で、黄丸で示した箇所は住宅が立ち並ぶ箇所で到達に時間的余裕があるものの避難を優先的に行うべき場所といえるだろう。

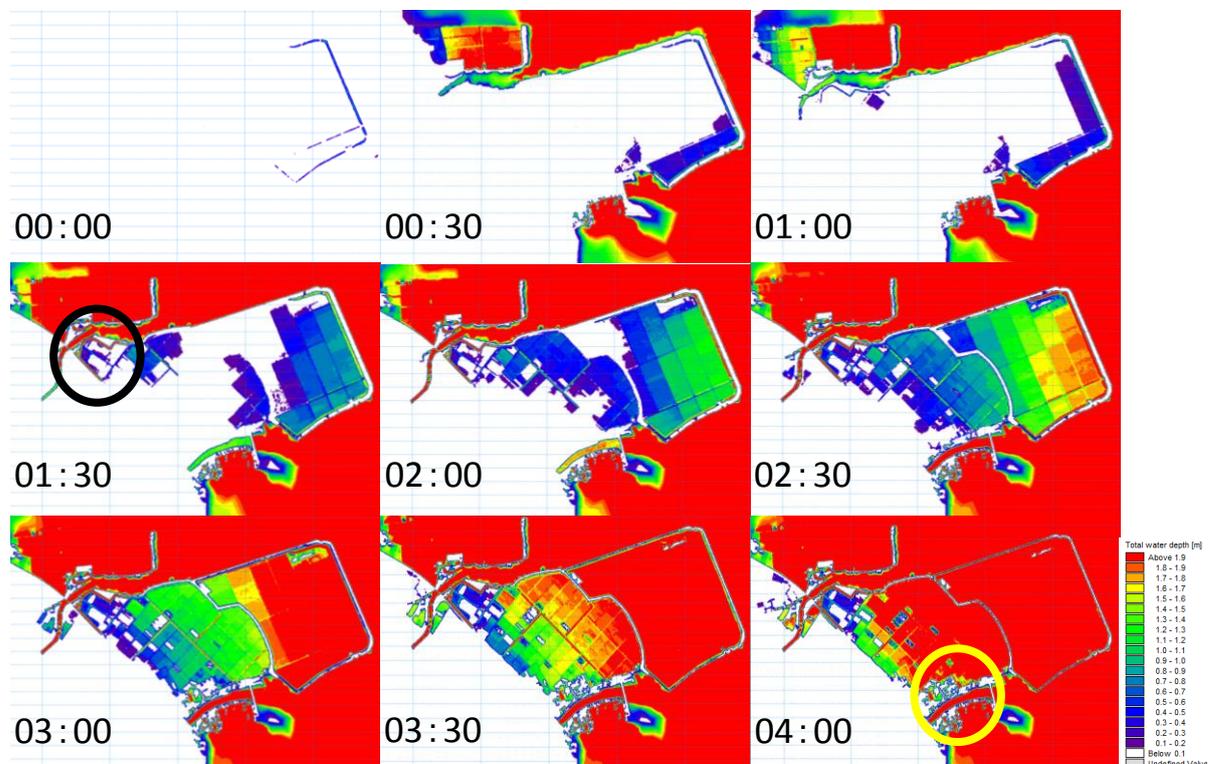


図 4.6.11 CASE6 氾濫解析結果

#### 4.7 第4章の結論

6つのケースのまとめとして図4.7.1に氾濫水による危険箇所を示す。まず、北東部は当然として堤防によってせき止められた高潮の氾濫水が滞留し、さらに各河川が氾濫した場合、最終的に氾濫水が到達する。この部分の特徴として、一部を除いてほぼ平坦な地形で、一度氾濫水が侵入すると広範囲に亘って広がることである。そのため、氾濫水が到達した時点での避難開始は遅いと考えられる、住居はこのエリアの南部に集中しており土手の上に一時的な避難を行うといった選択肢があるが、一方で最南端の区画はトンネルを通して南西部へ移動することが最も避難所への近道(図4.7.2)となるが、標高が低く氾濫水が通りやすいため大きなリスクを伴う。

次に南部の東端、浜川に沿った小さな範囲は浜川からの氾濫が起こった際、高確率で集水する範囲である。この範囲は避難所に近いので氾濫前に避難を開始すれば容易に避難所に到達できるが、一度湛水が始まると、この近辺の道路は最大で2mの湛水が予測されるので移動は困難となる。

駅南部も同様だが、ここは避難所への避難ができない場合駅の避難も考慮に入れる必要がある。この駅は当然土手と同じ高さを有し、相対的に標高が低い箇所に囲まれている。しかし図4.7.3に示す箇所はCASE4のように度々北東部へ水を流す流路となっており、流れが早くなり危険である。基本的に堤防から離れるように避難を行い、それができない場合に駅への避難を選択すべきである。

緑で囲った部分は河川からの氾濫水の流路になりがちである。図4.7.4に示す通り幅員が広く避難経路として選定されやすいが、CASE1で示した通り、氾濫水は0.8m/sほどの速度で国道207号線に広がっていき、その速度は高齢者の歩行速度よりも速いため避難中に氾濫が起こった場合、氾濫水に巻き込まれる危険がある。

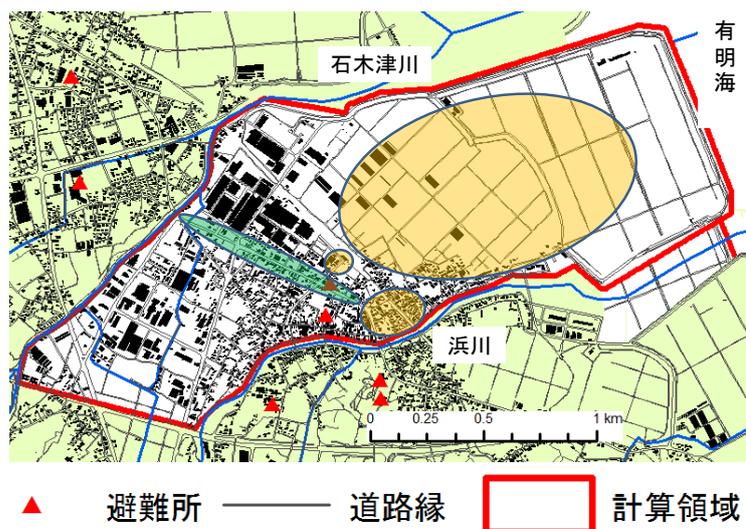


図4.7.1 水害危険箇所



図 4.7.2 トンネルと住居の位置



図 4.7.3 駅周辺の低部



図 4.7.4 駅周辺の広い避難経路

## 参考文献

- (1) 川池健司・井上和也・林秀樹・戸田 圭一: 都市域の氾濫解析モデルの開発, 土木学会論文集, No.698/II-58, 1-10, 2002.8.
- (2) 福岡捷二・川島幹雄・横山洋・水口雅教: 密集市街地の氾濫シミュレーションモデルの開発と洪水被害軽減対策の研究, 土木学会論文集, No.600/II-44, pp.23-36, 1998.8.
- (3) 武田誠・井上和也・上塚哲彦・松村貴義: 高潮解析における数値解析モデルおよびその境界条件の検討, 水工学論文集, 第40巻, pp.1089-1094, 1996.
- (4) DHI : MIKE 21 & MIKE 3 FLOW MODEL FM, 52p., 2014.
- (5) Wu, Jin : Wind-stress Coefficients over sea surface and near neutral conditions –A revisit, Journal of Physical, Oceanography, 10, pp.727-740, 1980.
- (6) Wu, Jin : The sea surface aerodynamically rough even number light winds, Boundary layer Meteorology, 69, pp.149-158, 1994 .
- (7) 鹿島市 : 鹿島市災害史 第二巻, 223p., 1979.
- (8) 松岡晋 : 水路・道路網系における洪水氾濫水の流れ解析, p.3, 平成 20 佐賀大学卒業論文.
- (9) 椿東一郎 : 水理学 I, p.196, 1973, 森北出版.
- (10) 佐賀県 : 浜川水系河川整備基本方針, p.4, 2003.
- (11) 鹿島市 : 鹿島市洪水ハザードマップ, 2010.
- (12) Atiestides Kadunge Torry Dundu : A storm surge analysis in the Ariake Sea for the coastal hazard management in Saga Lowland, 134p., 2012.
- (13) 日本海洋データセンター  
[http://www.jodc.go.jp/jodcweb/index\\_j.html](http://www.jodc.go.jp/jodcweb/index_j.html)
- (14) 気象庁 過去の気象データ検索  
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?sess=6ef525a9cdef28cea634ce58ca736e68>

## 第5章 避難経路解析

### 5.1 概要

近年，我が国では堤防やダムなどの水理構造物の整備など所謂「ハード的対策」が行われている一方で，人口，財産の集中化などが原因で依然として毎年水害によって人命は失われており（図5.1.1），被害額も減少しているとは言い難い（図5.1.2）．水害における人的被害を最小限に軽減するために避難活動は最も重要であり，避難計画は各自治体によって作成される防災計画でも重要な位置を占める．その中でもより効果的な避難方法の模索は重要な課題であるといえる．

ここでは前章による氾濫水の時々刻々の湛水状況及び流速の平面的分布の予測値を基にして，避難者の歩行による移動を想定した最短経路問題としてモデル化を行う．この方法により避難施設の適正配置や避難経路の危険度などを評価することができ，より適切な避難方法の模索に貢献ができると考えられる．

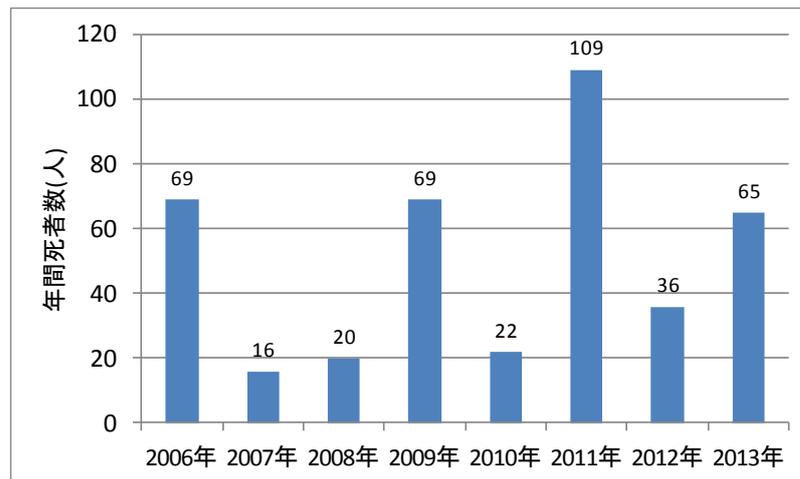


図5.1.1 水害による年間死者数<sup>1)</sup>

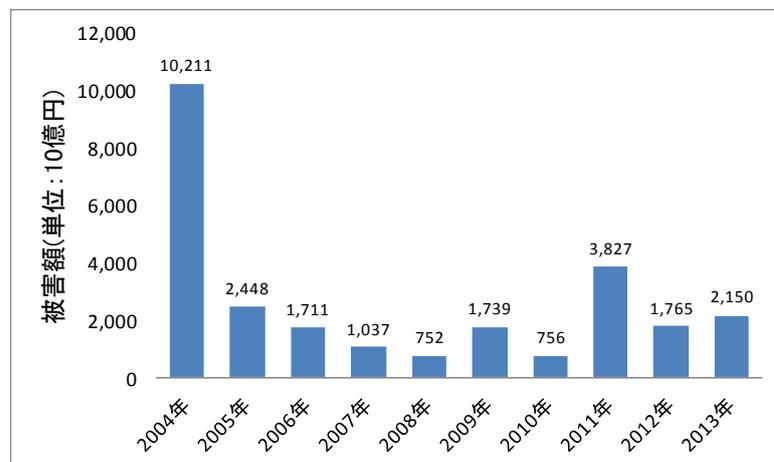


図5.1.2 水害による被害総額<sup>1)</sup>

## 5. 2 避難経路選定システム

避難経路解析の構成要素として避難者のモデル化，移動経路のネットワークモデル，予測される氾濫水の挙動，の3つを考慮することとする。

避難者については実際の鹿島市浜地区の人口などから推察する方法と代表的なパラメータを持つ避難者モデルを想定する方法が考えられる。前者は実際の対象地区のより現実的な避難行動を予測するために有用であると考えられ，後者は物理的要因から避難上の危険個所の検索に有用であると考えられる。

また，本研究では歩行避難を想定しているが，実際にはその他の避難行動も想定される。例えば車や自転車による避難や氾濫後に取り残された要救助者をヘリコプターや船などによる救助である。

車による避難は一般に水没による故障や乗り捨てによる避難行動や緊急車両などの妨害などのリスクがある。また片田ら<sup>2)</sup>はリアス式海岸を対象とした避難シミュレーションで自動車の使用は被害の増大に直結しやすく，要援護者の救援など限られた用途にのみ用いるべきだと述べている。自転車についても同様で，水中での運転は困難で乗り捨てによる避難妨害などを引き起こす。そこで本研究ではこれらによる避難は想定せず一考察程度に留めるものとする。

また，避難を行わない，若しくは行えず自宅などの2階などで一次的に難を逃れ，救助や氾濫が収まるまで待機する垂直避難なども考えられるが，このような行動をとるか避難を開始するかは極めて経験や心理的影響を受けやすく，定量化は非常に困難である。よってこれらもこの章における解析では考慮せず一考察に留める。

避難経路として用いられる通路の情報元として近年では多くのGISデータが一般に無料公開されている。これらは日本測地系を始めとした座標系が設定されており，複数の異なるデータを重ねたり実際の距離を算出可能であったり非常に便利な機能を有している。本研究ではこれらを利用して避難経路に必要な情報を得，氾濫解析の結果との関連付けを行う。本研究ではそれに加えて現地観測を行い，データ上では確認し難い階段や細道，水路などの確認を行った。

### 5. 2. 1 避難者

水害時に住民が避難行動を起こす際の要因として水害経験や意識・生活形態等，水害時避難行動の初期条件となるもの，水害時に提供される情報や降雨・浸水状況などの外的要因，情報に対する反応の基礎となる内的要因がある<sup>3)</sup>。厳密にはこれらの情報を用いて住民一人ひとりをモデル化する必要がある。しかし，これらの情報の把握は極めて困難であり，膨大な情報量から計算機に掛かる負荷の大きさも相当なものであると予測される。また，実際の避難行動は個人で行うものとは限らず，家族や近隣住民と共同で行われることが想定される。これらの要因から避難者モデルは一人以上のグループを1単位とし，代表的なパラメータを与える手法が妥当であると考えられる。さらに問題を単純化するためにこのグループは最も歩行速度が遅い避難者，最も背の低い避難者など最も値の小さい情報を与え一定の避難行動を終えるまで離別

しないものとする。

図5.2.1に鹿島市の人口の地区別割合，表5.2.1に鹿島市全体の年齢別人口を示す．これらの情報を参考として浜地区の年齢別人口の推定を行う．すると少年人口（0-14歳）が約465人，生産年齢人口（15~64歳）が2168人，老人人口が784人となる．老人人口の内，表5.2.1の要介護者，要支援者は実際には歩行による避難を行わないものとする約635人と仮定することができる．これらの情報からさらに各グループの歩行速度，身長を仮定し，このパラメータを避難者グループのパラメータとしてモデル化を行う．

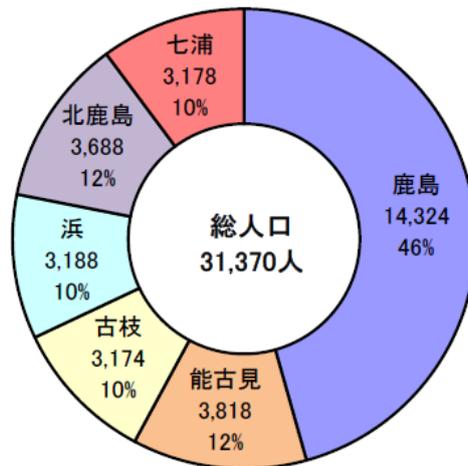


図5.2.1 鹿島市の地区別人口<sup>4)</sup>

表5.2.1 鹿島市の年齢別人口<sup>4)</sup>

年次	年少人口割合	生産年齢人口割合	老年人口割合
平成 2年	21.1%	62.9%	16.0%
平成 7年	19.4%	61.7%	18.9%
平成12年	17.4%	60.9%	21.7%
平成17年	16.0%	59.7%	24.2%
平成22年	14.6%	60.8%	24.6%

表 5.2.2 鹿島市の要介護(要支援)認定者数<sup>4)</sup>

(単位:人)

年度	要支援		要介護					計
	要支援1	要支援2	要介護1	要介護2	要介護3	要介護4	要介護5	
平成18年	230	129	316	203	168	150	102	1,298
平成19年	227	204	290	233	176	169	96	1,395
平成20年	217	203	286	233	184	165	111	1,399
平成21年	210	195	288	232	210	158	125	1,418
平成22年	215	215	318	235	208	164	136	1,491

### 5. 2. 2 移動経路のネットワークモデル

避難解析において避難者の移動には道路などの道，空地などの横断が考えられる．そこで国土地理院<sup>9)</sup>が公開している道路縁(図 5.2.2)の GIS 用のデータや現地観測を参考にしてネットワーク網を作成した．道路縁データの座標系は氾濫解析のメッシュとの接続を行うため平面直角座標系の 2 系を用いた．



図 5.2.2 道路縁(国土地理院)

ネットワーク網は道路をモデル化したブランチ(枝)とそれらの結合点であるノード(節)によって構成される．ノードやブランチの設置には以下のことに留意している．

- a. 道路縁を参考に道路の交点に設置する．
- b. 避難経路として設定する際，家屋間等の極端に幅員の狭い通路は除外した．
- c. 利用者が限られる工場の敷地内や住居の無い北東部のノードは一部簡略化する．
- d. 避難所については重要なノードであるので設定上特殊なノードとして扱う．

完成したものを図 5.2.3 に示す．

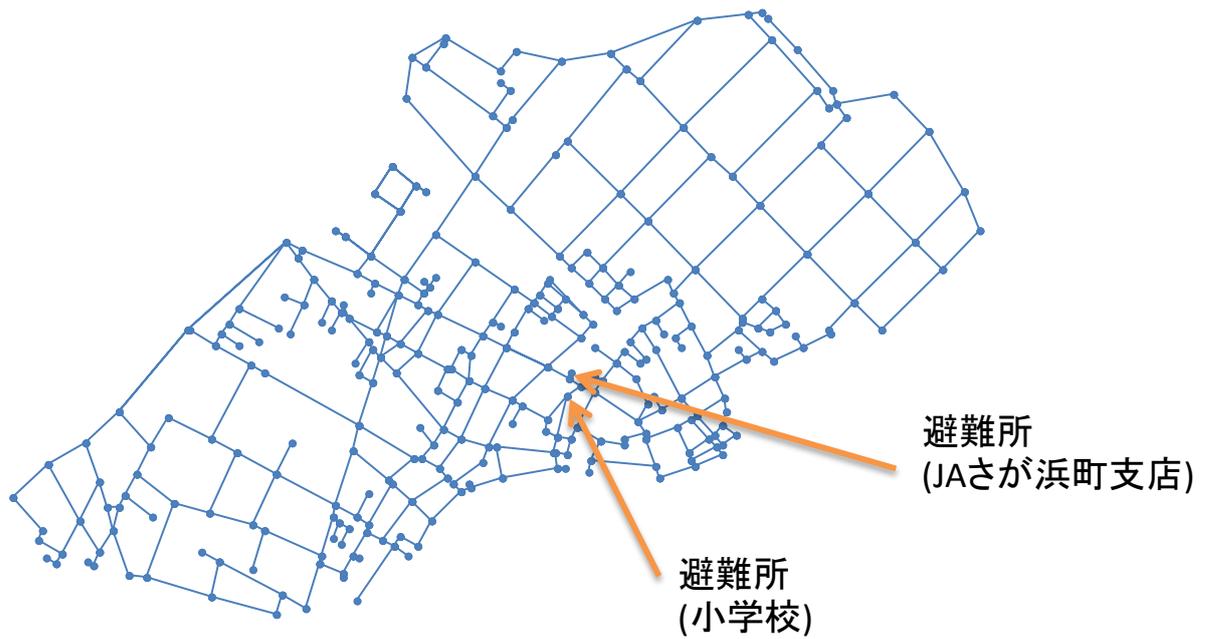


図 5.2.3 道路ネットワーク網

### 5. 2. 3 氾濫解析との接続

氾濫解析結果との連携には各ノードに水深及び流速を与える。この様にする事でブランチ内の水深及び流速を線形補完することができる。氾濫解析で用いた座標系にネットワークモデルの座標系を合わせることでこれらを可能とする。本江研究では直角座標系の第2系を使用し、長崎を除く九州地方で共通して使用可能となっている。

### 5. 3 避難行動解析の理論

ここでは避難解析における諸条件や最短経路の検索について説明する。4. 2で述べたように避難の初期条件として実際の住民データに基づいて避難を行うものと代表値を使用するものが考えられる。ここではそれらの決定方法についても説明する。

#### 5. 3. 1 避難開始の決定

実際の洪水氾濫による災害の認知方法は、大きく二つに分類される。一つは避難勧告や警報、近隣住民や市職員などからの直接的避難指示であり、もう一つは氾濫水を見て認知する場合である。警報の認知率は主として情報伝達の方法や警報の時期、それに情報を得た住民の防災意識などに左右される。しかし、ここでは警報が発令された場所ではすべての住民が警報を認知したものとする。また、氾濫水を見て認知する場合についても家屋の位置や構造、破堤の時間帯などによって変わってくる。また、住民は洪水氾濫を認知したあと避難を行うか否かについての意志決定を行う必要がある。実際にはその湛水深によって避難の意思決定の割合は違うが、ここでは一定量（20cm）の湛水がある場合、避難の開始を決定するものとする。

#### 5. 3. 2 避難場所の決定

避難の意思決定を行った後の住民の避難行動をどのような形でモデル化するかは、避難行動のシミュレーションモデルにおいて基本的な問題である。一般に、複数ヵ所点在する避難施設から、住民が一つの避難施設を選択する際に考慮する要因としては、施設の安全性、施設までの距離、施設の周知度、避難経路の有無、避難経路の安全性などがあげられる。この中で、施設の安全性、周知度などは避難施設の計画段階で一次評価を受け、要件を満たしているものであるから、避難施設の選択はその施設までの距離、換言すれば所要時間によって決定されるものと考えられ<sup>5)</sup>。このような観点から、避難施設の選択を、ネットワーク理論の最短経路選択問題としてモデル化する。すなわち、あるメッシュ内の住民は、避難中の時間毎に、それぞれの避難施設までの所要時間を避難経路の浸水状況を考慮に入れて計算し、もっとも短時間で到達可能な位置にある避難施設へ向かって避難すると仮定する。

#### 5. 3. 3 最短経路の決定

避難経路の設定には最短経路問題であるダイクストラ法<sup>6)</sup>を基本としたものを用いることとする。これはグラフ理論によって解かれるものである一点を開始地点、別の一点を目的地点とした場合の最短経路を求められ、複数の目的地の内、最も近いものを検索するという機能も持つ。

まずノードには以下の要素を持たせる。

1. 番号
2. 価数:ノードに接続しているブランチの数
3. 状態:ここでは最短経路が確定したノードか否かである。
4. 前ノード:最短経路を辿った場合の1つ手前のノード
5. 距離:最短経路で到達した場合の距離

実計算ではこの他に各ノードの座標, ブランチに番号, 長さ, 両端の接続ノードなどが設定されているがここでは省略する。

実際の解法を以下に示す(図 5.3.1)。

1. 初期条件として初期位置のノードの価数を 0, 距離を 0, 状態を確定に設定する。
2. 確定状態のノードに隣接したすべてのノードを検索ノードとし, そこまでの距離を算出する。
3. 距離が最も小さい検索ノードを新たな確定ノードとする。
4. 2 から 3 を繰り返し目的地のノードが確定ノードになった地点で前ノードをたどると最短経路となる。
5. 複数の目的地がある場合すべての目的地が確定ノードになるまで試行を繰り返す。

図 5.3.1 からも分かる通り施行を繰り返すと目的ノードのみでなく, 全てのノードの最短距離とその経路が算出されていることが分かる。これにより最短経路の検索のみならず最近の避難所の検索もこの手法で検索可能である。

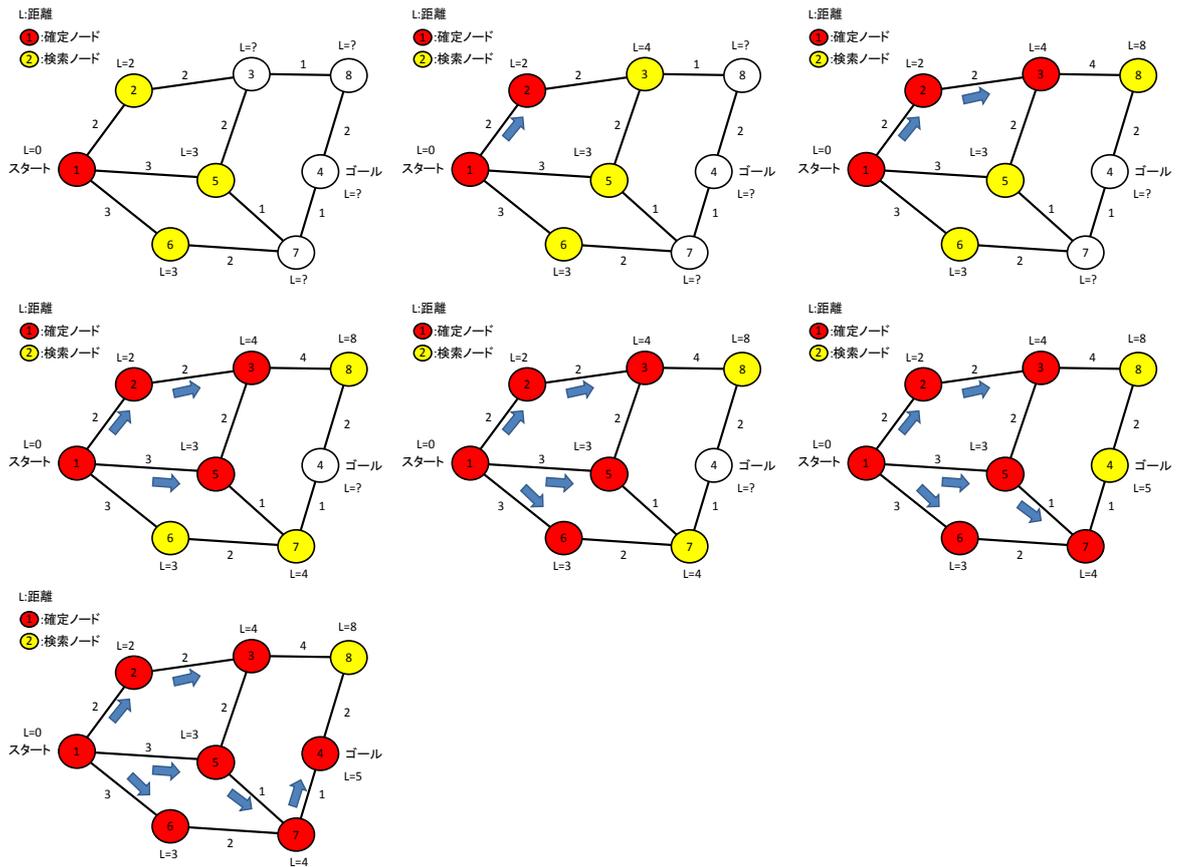


図 5.3.1 ダイクストラ法の模式図

### 5. 3. 4 その他の設定

前述の方法で最短経路は求められるが避難解析を行う際には氾濫水の湛水状況や避難指示の方針によって通行を制限するケースがある。湛水状況による通行の制限には須賀ら<sup>8),9)</sup>が実験水路中の歩行実験により算出した流速と水深身長比による判定方法を参考にする。図 5.3.2 に示される青いラインより上の状態、つまりある流速の時に身長に対して浸水している深さが青いラインより高い場合歩行ができない状態、つまり歩行不可能な通路と判断する。

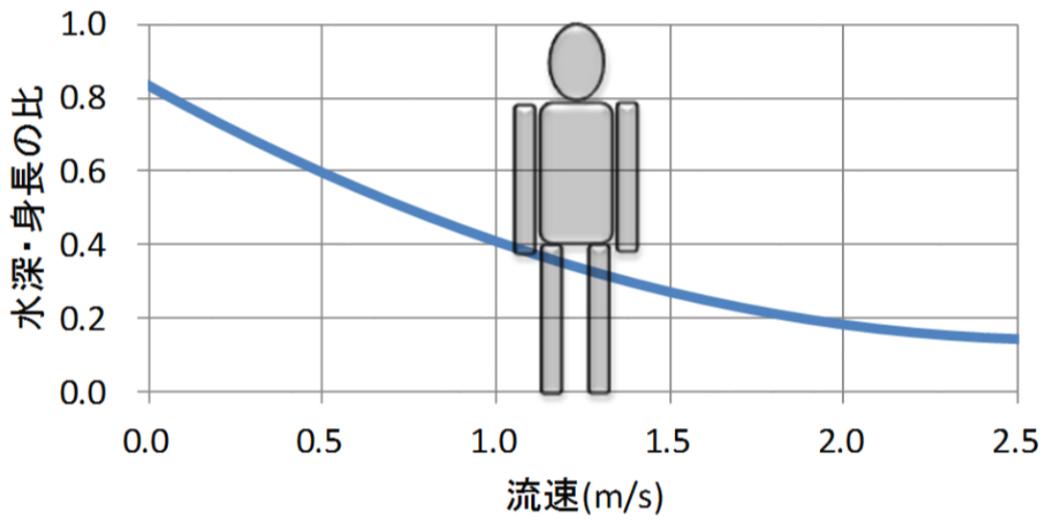


図 5.3.2 水深身長比と流速による歩行可能判定基準

実際にダイクストラ法を採用する際には、この歩行不可能基準を満たすブランチ長さのパラメータを非常に大きな値に更新することで最短経路の検索に架からないようにする。図 4.3.3 に赤で示されるように通行禁止状況は時々刻々の浸水状況により逐一更新される。

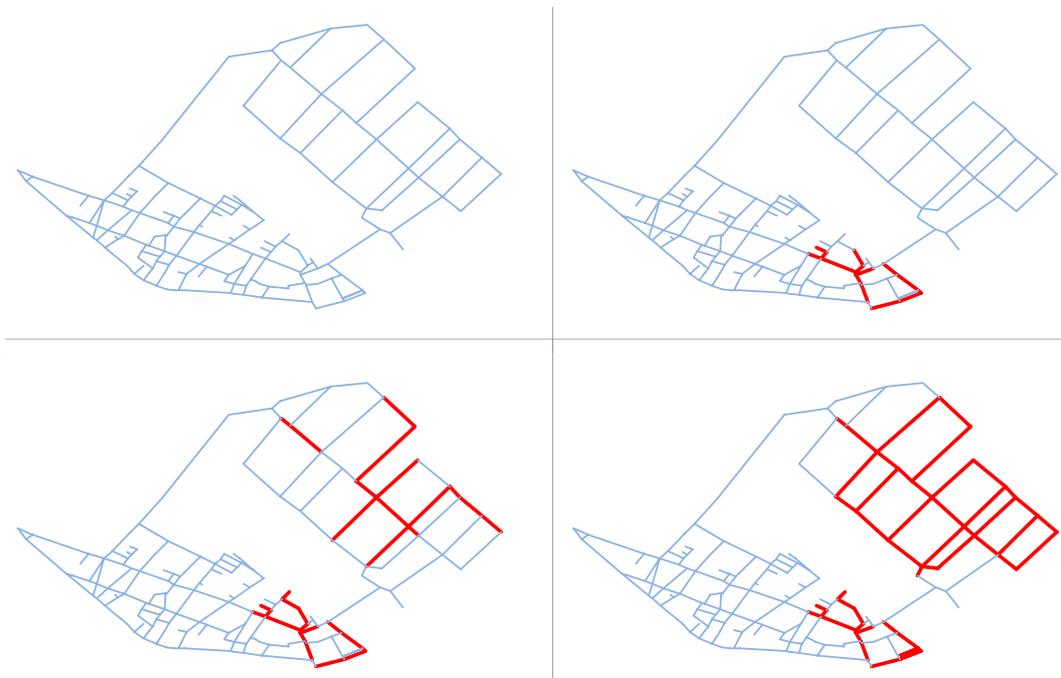


図 5.3.3 通行不可能箇所の変遷の例

### 5. 3. 5 歩行者モデルの移動方法

歩行者モデルは基本的に各単位時間に以下のことを繰り返す。

- 目的地をダイクストラ法により検索し年齢毎に決めた歩行速度で歩行避難を行う。
- 避難所への到達した場合、避難成功とみなす。
- 浸水の進行により目的地へのいかなる経路をもってしても到達できない場合、他の目的地を検索する。
- 如何なる目的地(避難所及び高所など)へも到達不可能な場合、到達可能な避難所を目的地とし移動を行う。
- 現在地が水没、あるいは如何なる近隣ノードへも移動ができなくなった場合避難失敗と判断する。

なお、避難開始の条件として浸水による避難開始が採用されたとき、急激な水深の増加により自宅(ノード)などから動けなくなるケースについてもここでは失敗と判断する。また、歩行による疲労や水中歩行に際して歩行速度に制限を設ける。西原<sup>3)</sup>や明田ら<sup>10)</sup>の研究をベースに初期歩行速度に以下の係数  $T$  と  $W$  を乗じたものを各時間の移動速度とする。

まず、疲労に関しては避難者それぞれの歩行速度での移動を行うことを考慮して各住民の移動時間  $t$ (時間)を変数とした以下の式を使用する

$$T = \frac{1.0}{0.98164 + \exp(1.12t - 4.0)} \quad (5.1)$$

この係数  $T$  による影響度を表 5.3.1 に示す。

表 5.3.1 疲労による係数の影響度

時間(hour)	係数 $T^t$
1	1.00
2	0.96
3	0.87
4	0.66
5	0.38
6	0.17
7	0.06
8	0.02
9	0.01
10	0.00
11	0.00

次に水中歩行による係数  $W$  は以下のものである<sup>9)</sup>。

$$W = -\frac{1.0}{C}d/H + 1.0 \quad (5.2)$$

ここで  $C$  は限界身長水深で図 5.3.2 から求める。  $d$  は移動中の経路の水深、  $H$  は避難者の身長である。 この式からも分かるように、歩行限界となる水深に達した場合、水中歩行による係数は 0 以下となり実質歩行不可の扱いとなる。 また、水中歩行による疲労を考慮するために、水中歩行を行った実距離を水中歩行による係数で除したものを仮想のブランチ距離として疲労にかかる移動時間を増加させる

$$L_n' = L_n / W \quad (5.3)$$

ここで  $L_n'$  は疲労を考慮した仮想距離、  $L_n$  は実距離である。

#### 5. 4 避難経路の検証

ここでは氾濫水が域内に侵入した瞬間に全ての場所から避難を開始した場合の避難の様子を示す。この条件で解析を行うことでどの場所から避難を開始し、どの経路を通ることで避難に成功、失敗したのかを把握する。避難者のモデルは歩行避難で後れを取りやすい高齢の女性<sup>10)</sup>を想定して0.95m/s、身長は1.56mで統一した。

図 5.4.1 に CASE1 の氾濫時の結果を示す。黒い線が移動可能な通路、色付けされた通路は浸水深を表示させている。赤い三角形は住民の位置を示す。ここで右下の状態は住民が避難完了もしくは失敗した状態である。

ここで、2つのノード間ノード A からノード B への移動中に避難失敗（もしくは水没）した場合、避難者の位置はノード A に表示されるようにした。避難所周辺の最終状態の一部を拡大した図 5.4.2 において丸で示した個所は避難成功者を、それ以外は避難所へ至らなかったことを表す。

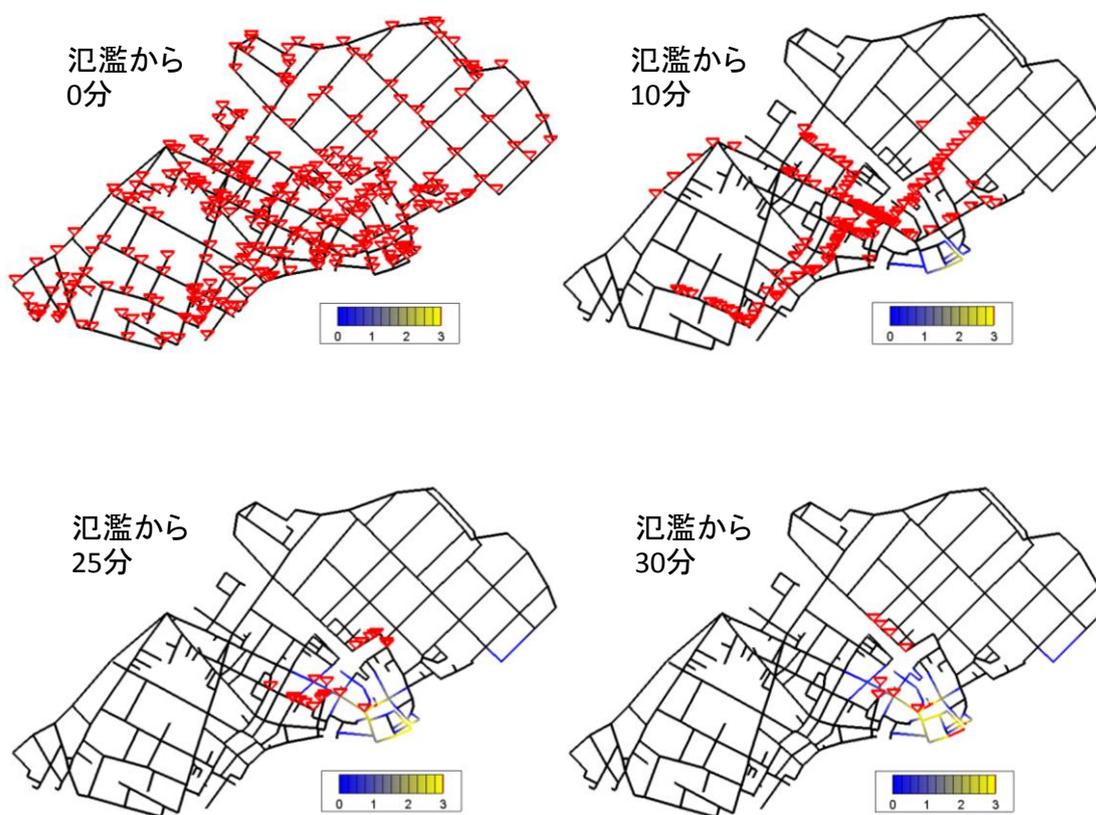


図 5.4.1 氾濫と同時に避難を行う様子(CASE 1)



図 5.4.2 氾濫と同時に避難を行う様子(CASE 1, 避難所周辺)

図 5.4.3 に避難開始から全避難者が避難完了または失敗するまでの、避難中、避難成功、避難失敗の割合の推移を図 5.4.3 に示す。この図から 28 分 30 秒ほどで避難中と避難失敗が大きく入れ替わる場所が見て取れる。このタイミングで避難所周辺が水没し避難中に避難所への移動を断念した避難者が表れた時間である。つまりこの図から全員が安全に避難所に到達するためには氾濫開始から 28 分 30 秒までに避難を完了する必要がある。さらにこの図から避難の成功率が 96%であることも分かる。

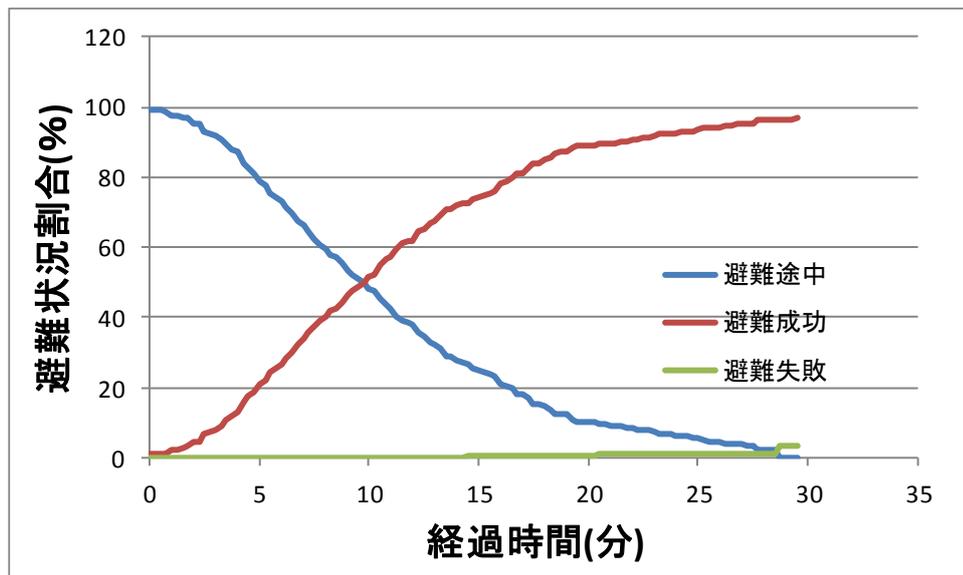


図 5.4.3 避難状況の推移 (CASE1)

CASE1 では第3章で述べたように氾濫開始から約15分で避難所周辺の浸水が始まる。そのため避難所の東で氾濫水に接触した住人が被害にあっている。また、図5.4.2の避難所の北で数カ所避難失敗となっているものがある。これらは避難所から遠い場所から避難しており、北部から南部への移動に使われる通路を水没前に通過することができずに迂回をしている。これらの移動経路を図5.4.4に示す。



図 5.4.4 避難失敗した移動経路(CASE 1)

図 5.4.5 に CASE2 における避難失敗経路の初期位置，避難失敗箇所とその一部の経路を示す。避難者モデル，避難開始条件は CASE1 のものと同様である。この CASE2 では CASE1 より南側から氾濫水が流入しており，避難所より南側の住民の一部が避難所に辿り着けない結果となった。また CASE1 では避難所周辺の浸水が早かったため北部からの避難者が迂回したが，この CASE2 では避難者が氾濫水に接触した。実際の避難計画ではこのような場合，より危険な状況に備える必要があり，避難所東部は避難経路として使用すべきではないという認識が必要と思われる。

図 5.4.6 に避難状況の推移を示す。この図からこの CASE では急激な変化はなく，洪水接触による被害が主であることが推測できる。避難の成功率は 99%であった。



図 5.4.5 避難失敗した移動経路(CASE2)

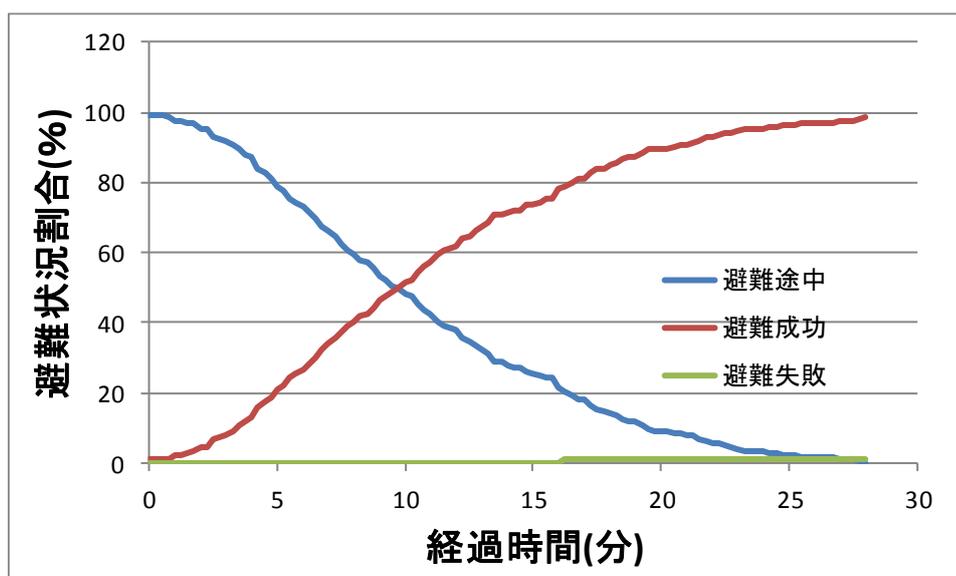


図 5.4.6 避難状況の推移 (CASE2)

図 5.4.7 に CASE3 における避難失敗経路の初期位置, 避難失敗箇所とその一部の経路を示す. 氾濫水の流入箇所が幅員の広い道路などがあり早い段階で国道 207 号線を浸水させたため, CASE 1 と同じく北部の遠い場所からの避難者が途中から迂回している.

図 4.3.8 に避難状況の推移を示す. この図からこの CASE では氾濫から 29 分で避難中と避難失敗が大きく入れ替わり, その時間が避難限界時間であるといえる, 避難の成功率は 96.5% であった.

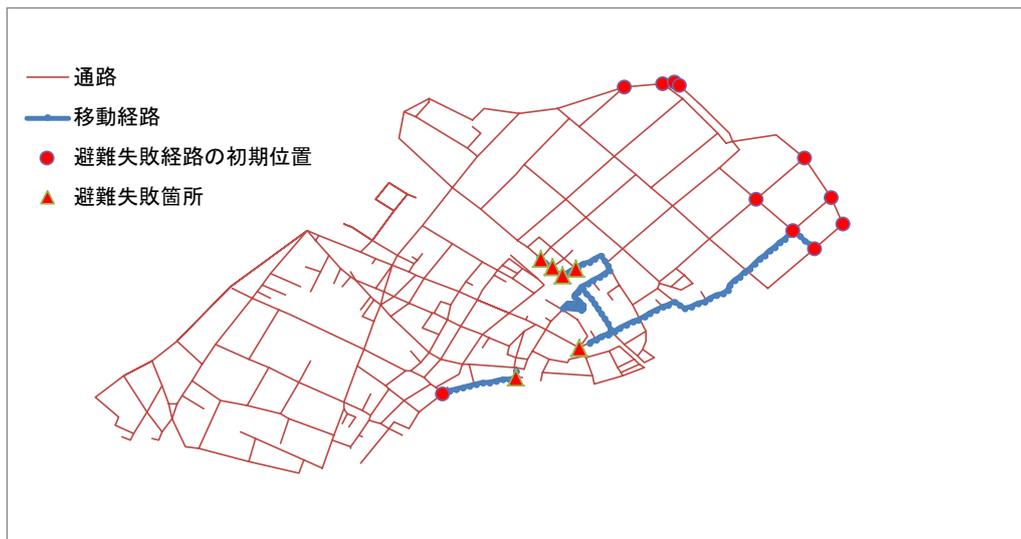


図 5.4.7 避難失敗した移動経路(CASE3)

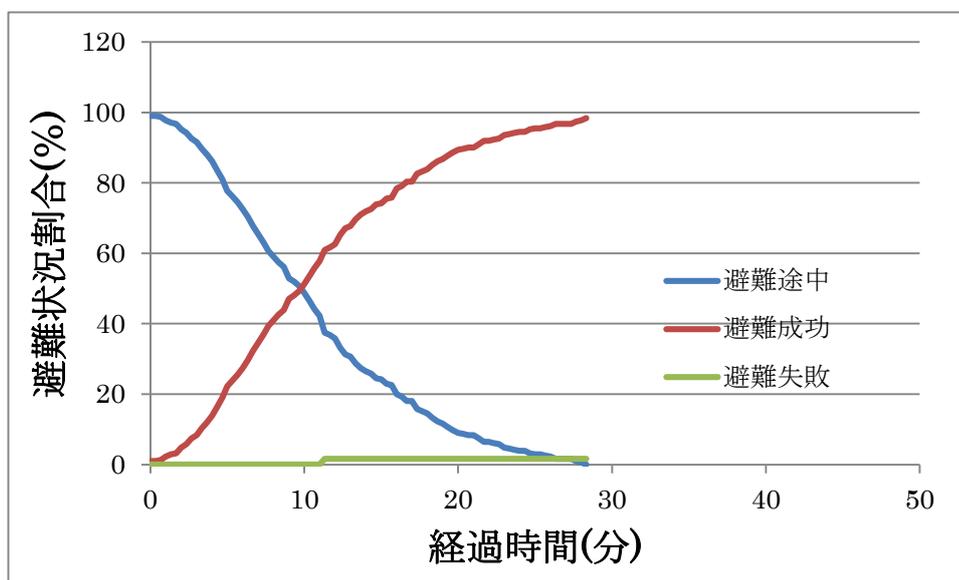


図 5.4.8 避難状況の推移 (CASE3)

図 5.4.9 に CASE4 における避難失敗経路の初期位置, 避難失敗箇所とその一部の経路を示す. CASE4 は浜川の上流部から氾濫しているために広い浸水範囲を有し, 他の CASE より水深が低い. そのため, 北部の住民はすべて避難所へたどり着けるといった結果となった. しかし, 流入箇所やそこから駅へ至る範囲では流れが速く南西部と避難所付近は氾濫水によって分断される形となる. 第 3 章でも示したようにこの分断は決壊から早い段階で起こり, 避難所を孤立させるため歩行避難によって向かうには危険が伴うといえる. この CASE で南部の遠方ではなく比較的近い個所の住民が避難に失敗して原因は失敗箇所を歩行中に水深が上昇し事故に合ったもので, それより遠い個所の住民は迂回し, 水深が下がった後に通過したため避難所に到達が可能であった

図 5.4.10 に避難状況の推移を示す. この図からこの CASE では急激な変化はなく, 洪水接触による被害が主であることが推測できる. 避難の成功率は 99.3%であった.



図 5.4.9 避難失敗した移動経路(CASE4)

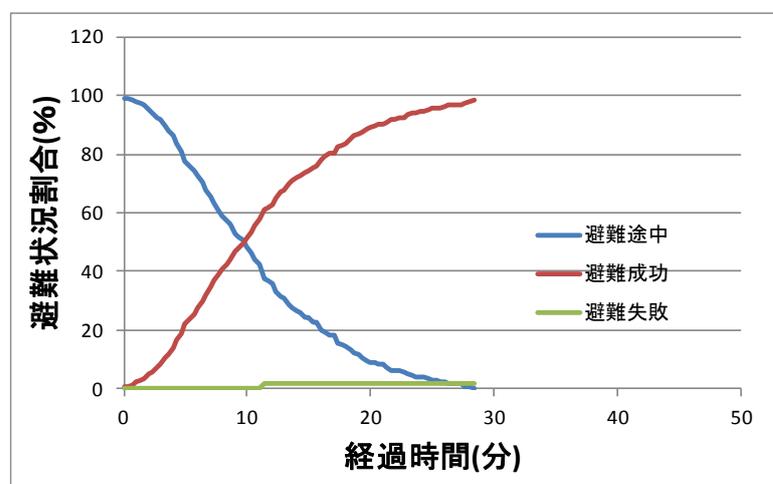


図 5.4.10 避難状況の推移 (CASE3)

CASE5 では氾濫直後に避難を開始した場合、最終的にはほぼ全ての住人が避難完了した。そこで氾濫から1時間後の状態から避難を開始したものを同時に図 5.4.11 に並べた。

氾濫から1時間後の避難を条件に算出したものでは西部にて多くの孤立者が現れる。これは避難を開始した時点で周囲の氾濫状況が進行しその場から動けなくなったことを意味する。ここで、中央の南部の避難者の分布を見ると南部ではより堤防から離れた経路を利用していることが分かる。堤防付近は浸水しており危険な状態であるため最終的な湛水状況から判断すると堤防から離れた経路が安全であるといえる。一方で北部の住民は西部の経路に迂回していることが分かる。西部の道路はCASE5 では安全な経路であるがCASE1~4 で述べたとおり浜川からの氾濫が起きた場合この周辺は高確率で危険状態となる。

図 5.4.12 に CASE6 における避難失敗箇所を示す。このCASE では高潮が域内に侵入した時点避難開始の基準としている。図には侵入と同時に避難したもの2時間後に避難した場合の失敗箇所を示した。これらの初期位置と避難失敗箇所は一致し、氾濫流の流入後に避難を開始しても間に合わないといえる。しかし、洪水と比べ、高潮は潮位の変化などから早い段階で発生が予測されるため避難中の事故は起こり難いといえるであろう。

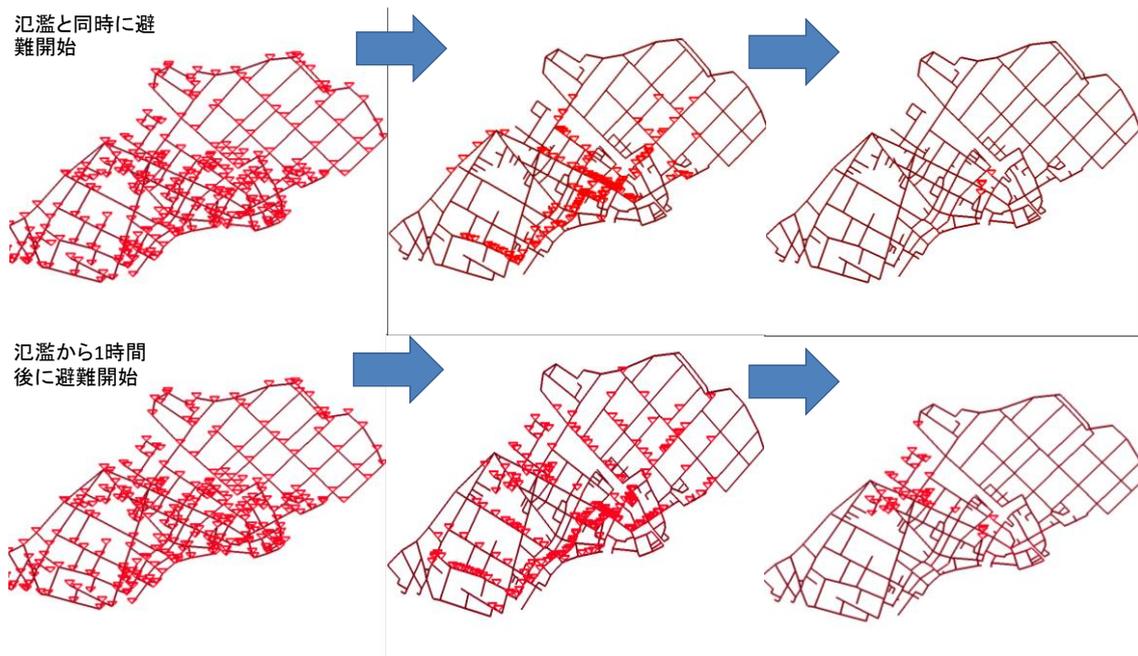


図 5.4.11 避難開始時間による移動の違い(CASE5)

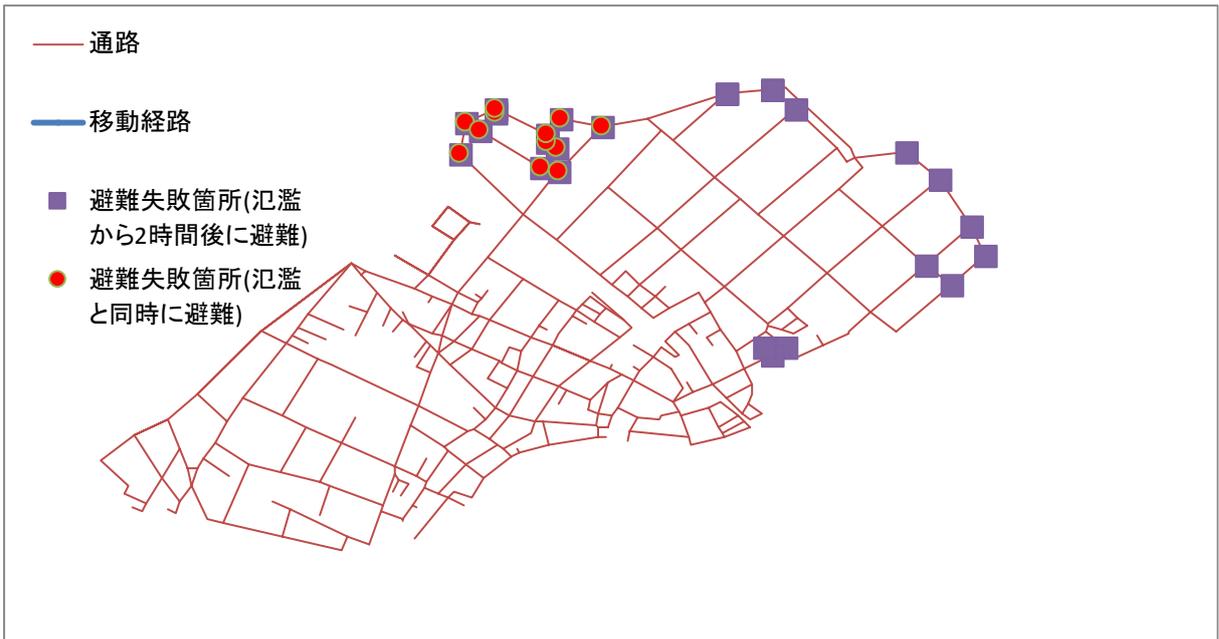


図 5.4.12 避難失敗箇所(CASE6)

## 5. 5 第5章の結論

本章では避難解析を行う上での必要な情報，条件設定などを示した。

この章における避難の成否の条件を避難所への到達としたことで各氾濫条件における避難可能な領域を可視化することができた。例として浜川からの氾濫を条件とした CASE1～4 の避難失敗経路の初期位置をまとめたものが図 5.5.1 である。

避難の失敗の原因は大きく二つに分かれる。

ひとつは CASE1 に多かった直接氾濫水に接触し被害にあうもで，避難開始は早期に行っているにもかかわらず歩行中の通路の水深が増加したことで身動きが取れなくなり，命を奪われる危険もある。鹿島市の浜地区でも 1962 年の水害で水に流され一人の住民が命をなくしている。これらの対処法としては主として氾濫より前に避難することである。方法としては河川の危険水位の観測情報への着目やそれに伴う早期避難誘導などがある。また情報としては第 3 章で示したような浸水深の情報が重要となる。

二つ目は避難所への移動経路が絶たれ，他の通路への迂回や立ち往生するものである。これは氾濫水に直接接触する場合に比べると命が奪われる危険性は低いが，その後の流況の変化次第では安全とは言えない可能性がある。対処法は氾濫接触と同様に早期避難はもちろんだが，移動経路の予めの選択が重要となっている。本解析のように水深に応じた避難経路の安否をあらかじめ把握すれば他の経路より標高，氾濫水の流動予測などから避難可能かどうかの判断が行える。

最後に第 3 章で示したような浸水，水流による危険個所（図 5.5.2）では最終的に「命を落とす危険がある個所」であり，逆の立場を言えば比較的安全な場所の抽出を行ったといえる。また，避難経路解析を行った結果，避難所へ至るためには浸水危険個所を通過する必要がある，現況の避難所へ向かうことの危険性が示され，避難解析を行ったことで被害にあう可能性がある場所も抽出される。これらを踏まえて，次章では氾濫解析と避難解析両法の結果を参考にした避難計画について述べていくものとする。



図 5.5.1 避難失敗経路の初期位置のまとめ

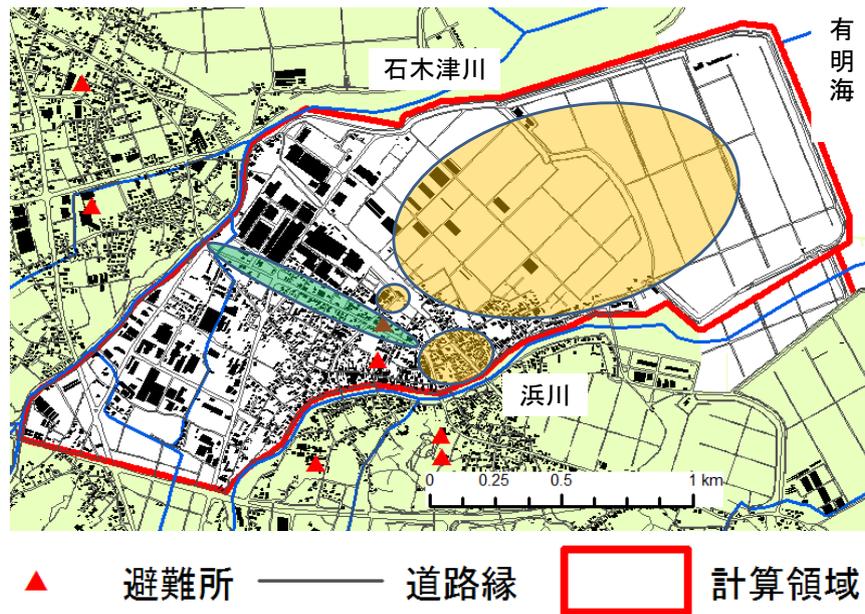


図 5.5.2 浸水, 水流による危険箇所

## 参考文献

- (1) 総務省統計局：e-Stat 政府統計の総合窓口  
<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/GL02100104.do?gaid=GL02100102&toacd=00600590>
- (2) 片田敏孝・桑沢敬行・渡邊寛：津波襲来時における自動車避難と人的被害の関係に関する一考察，日本災害情報学会第14回研究発表大会予稿集，pp.152-155, 2012.10.
- (3) 西原巧：氾濫解析に基づく避難システムの河川工学的研究，京都大学博士論文，215p.，1984.
- (4) 平成23年度版鹿島市データブック～数字で見る鹿島市の姿～，2011.
- (5) 高棹琢磨・椎葉充晴・堀智晴：水害避難行動のマイクロモデルシミュレーションと制御に関する研究，土木学会論文集 No.509/II-30, 15-25, 1995.2.
- (6) RAVINDRA K. AHUJA, THOMAS L. MAGNANTI, JAMES B. ORLIN: NETWORK FLOWS, PRENTICE HALL, pp108-113, 1993.
- (7) 国土交通省国土地理院 HP  
<http://www.gsi.go.jp/>
- (8) 須賀堯三・上阪恒雄・吉田高樹・浜口憲一郎・陳志軒：水害時の安全避難行動(水中歩行)に関する検討，水工学論文集，第39巻，1995.2.
- (9) 利根川研究会：利根川の洪水—語り継ぐ流域の歴史—。山海堂，1995
- (10) 明田修・天野貴文・内田裕丈：GISを用いた洪水氾濫時避難行動解析システムの開発，Theory and Applications of GIS, Vol. 15, No.1, pp.23-28, 2007.

## 第6章 避難計画への適用

### 6.1 はじめに

ここでは前章までに行った氾濫解析と避難経路解析を参考にした避難計画について考察を行う。方法としては第3章の6つのCASEの氾濫解析結果とそれに伴う避難経路解析を基本とし、氾濫解析については3章の条件、結果を採用し、それらをケーススタディとして、さらに条件を加えた避難経路解析を行った。ここで変更を加える条件は避難の初期条件や避難所の設定とした。

### 6.2 避難優先度から見た避難計画

第4章では避難開始時間を氾濫開始に合わせた計算を行ったが、ここでは各ケースで避難開始が遅れた場合の避難失敗経路の初期位置を抽出し、優先的に避難誘導、避難指示を出すべき場所について検討を行う。CASE6については前章で同様の検討を行ったのでここでは省略する。

図6.2.1～6.2.4に浜川からの氾濫を対象としたCASE1～4について氾濫と同時に避難した場合と5分、10分遅れた場合の避難失敗経路の初期位置を示した。集約したものは図5.2.5である。赤い丸で示した箇所は前章までと同じく氾濫と同時の避難では間に合わない箇所であり、優先的な避難誘導、指示が必要な箇所である。

CASE1とCASE2では分布が酷似している点としては時間がたつと北部の住人が避難に用いる経路が水没するため隔離されたような状況になることである。図からも分かる通り氾濫開始から10分でほとんどの住民が避難できなくなる。しかしこの地域は南部から順次氾濫水が流入する氾濫危険箇所でもあり、避難の必要性が重要になることがある。

そこで北部における浸水範囲が最も広いCASE1の浸水深（図6.2.6）と比べると、その浸水深は50cmから70cmであることが分かる。この浸水は一般に床上浸水がおり、住宅には害が起こる水深で、住民は避難を行うようになる。しかし、この水深は一般成人男性の腰までつかるとの水深で、容易な避難ができない水深でもある。つまり氾濫からおおよそ10分で避難をしなければいけないが、歩行による避難ができない場所といえる。

まとめると、浜町の北部は浜川の氾濫が起こった場合おおよそ10分以内に避難を完了させなければ取り残される。ここで、取り残されるとは2階への避難で一時的な安全が確保される可能性があることも含む。

次にCASE2とCASE4では、主に南部の住民が避難所へ到達できないことによる避難失敗が起きている。この原因は主として国道207号線からJR長崎線の間で盛土によって氾濫水の滞留が起こること、またそれが整備された広い道路を流路として迅速に起こることである。これらは比較的対処の選択肢が多く、早期避難、盛土から遠い道を選択するなどの経路選定、さらには浸水の危険性が低い場所では避難を行わないことが最も安全である可能性もある。さらにCASE4では上流からの氾濫で浸水範囲は広いが、その浸水深は深くない傾向にあるため（図

6.2.7) 避難の途中で氾濫水に接触しても健康な避難者なら水中歩行により難を逃れる可能性もある。この中で危険な箇所は浜川に沿った範囲で特に避難所から浜川の間は浸水深も広く氾濫後から 10 分後には避難できなくなる。

まとめると、浜町の南部では国道 207 号線から盛土と浜川の間は常に避難を行いにくくなっている。それ以外の箇所については比較的避難優先度は低い。

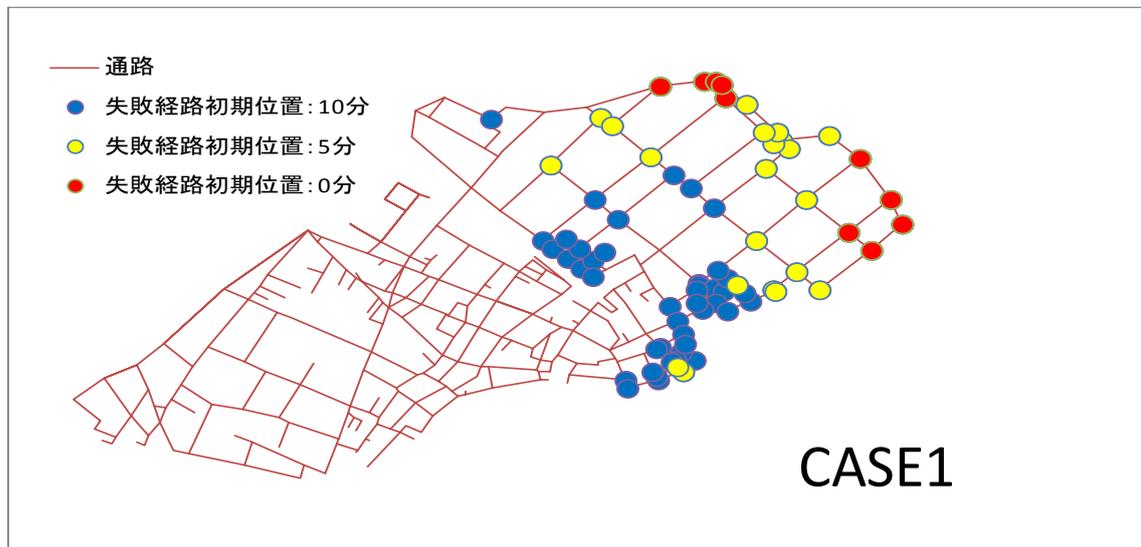


図 6.2.1 時間経過による避難失敗初期位置の変化 (CASE1)

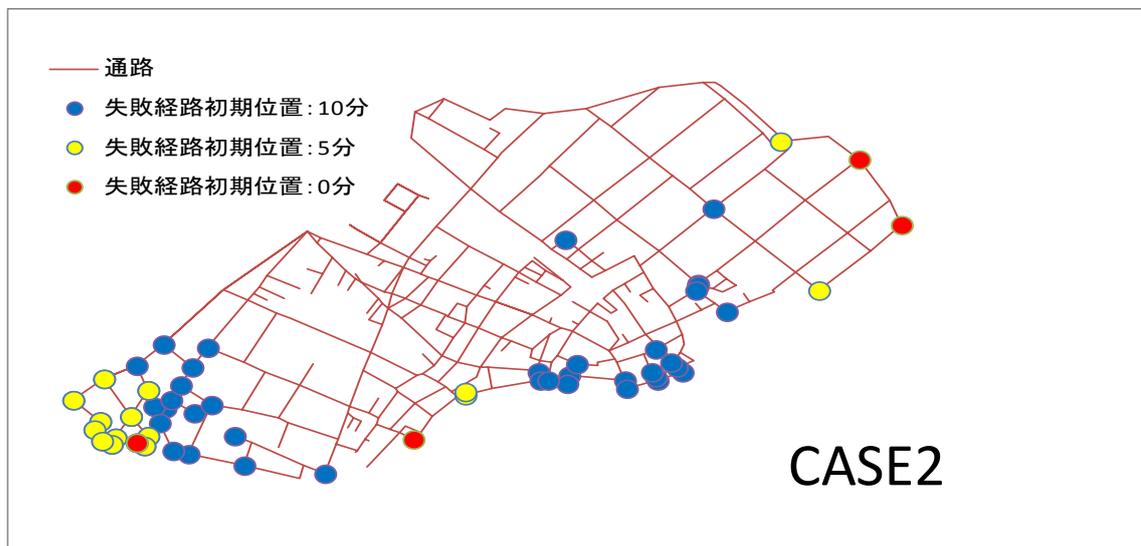


図 6.2.2 時間経過による避難失敗初期位置の変化 (CASE2)

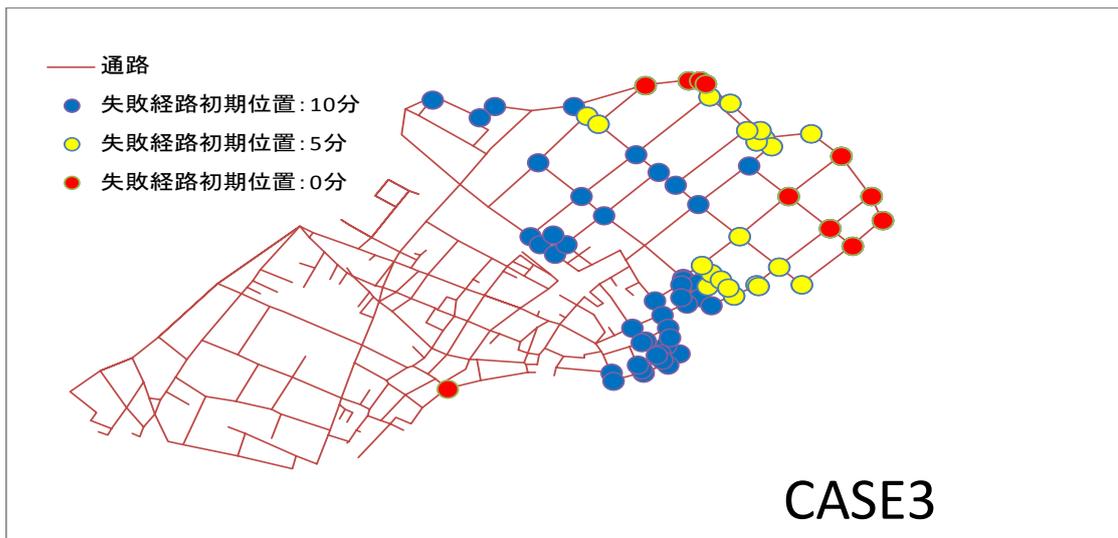


図 6.2.3 時間経過による避難失敗初期位置の変化 (CASE3)

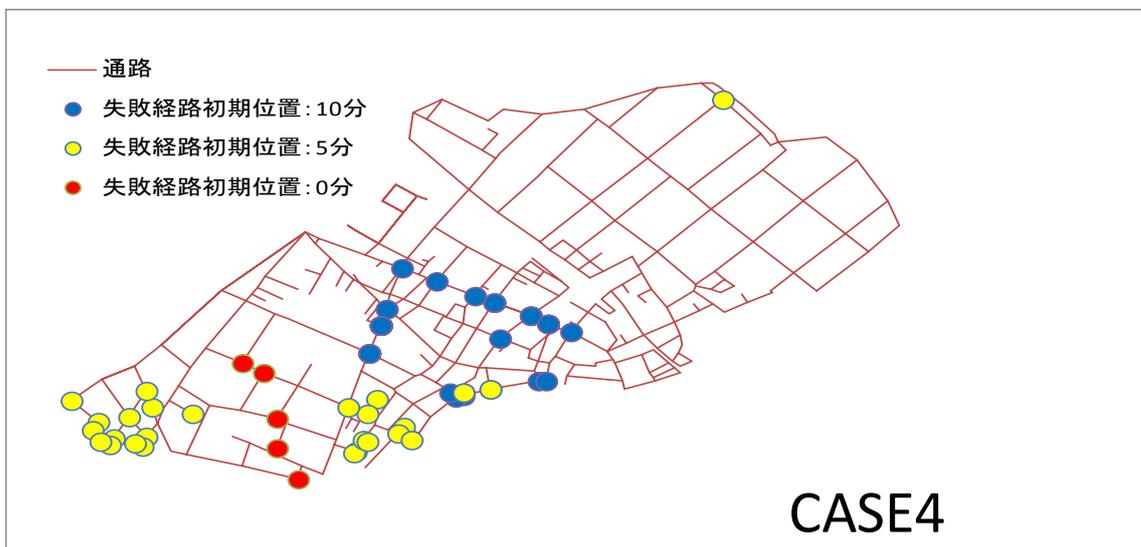


図 6.2.4 時間経過による避難失敗初期位置の変化 (CASE4)

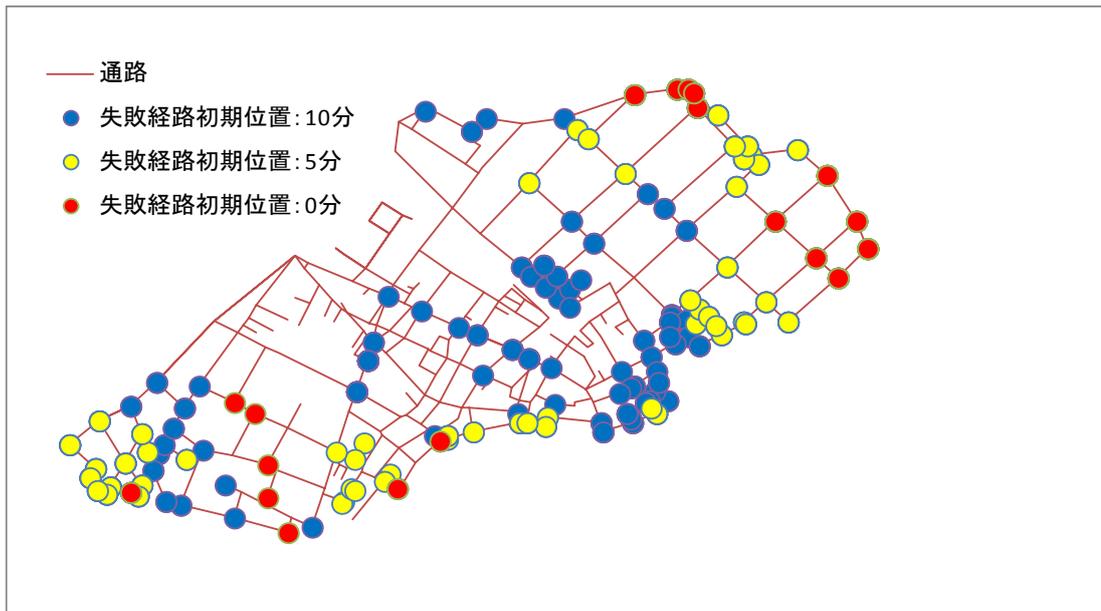


図 6.2.5 時間経過による避難失敗初期位置の変化 (各 CASE 集約)



図 6.2.6 氾濫開始から 4 時間後の浸水深 (CASE1)

04:00



図 6.2.7 氾濫開始から 4 時間後の浸水深 (CASE4)

図 6.2.8 に石木津川からの氾濫を対象とした CASE5 について氾濫と同時に避難した場合と 5 分、10 分遅れた場合の避難失敗経路の初期位置を示した。この結果からは東部には、時間が経過することで避難できなくなる箇所が集まっていることが分かる。これらの多くは比較的標高の高い位置にある工場で、図 6.2.9 に示す様に氾濫の影響を受けにくい箇所である。このような場所では避難を行って前述の様に氾濫水の影響を受け易い国道 207 号線を避難せず待機していた方がより安全であるといえる。さらには一時的な避難場所として開放した場合被害の現象につながる可能性があるが、検証に関しては後述するものとする。

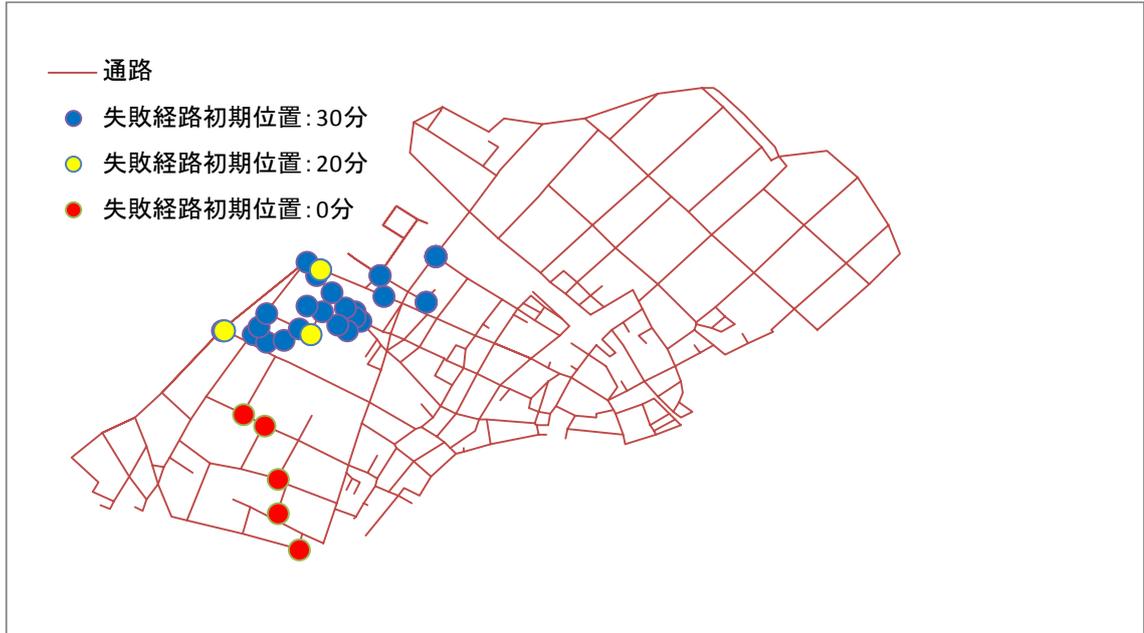


図 6.2.8 時間経過による避難失敗者の初期位置の変化 (CASE5)

04:00



図 6.2.9 氾濫開始から 4 時間後の浸水深 (CASE5)

### 6. 3 避難所の位置から見た避難計画

前節の CASE5 の例のように市が指定した場所より避難所の位置として適した場所について検証を行う。

検証の方法は CASE1 の氾濫から 10 分遅れた場合でも北部の住民を避難させることができる避難場所の検証を行う。

まず、図 6.3.1 から図 6.3.4 に設定した追加の避難所の場所及び避難失敗の初期位置を示す。図 5.2.1 に黒丸で示した避難場所は前節でも述べた様に浸水の危険が少ない高所に位置しており、浜川から離れた場所にある。結果としては被害の軽減はあまり見込めないことが分かった。原因は氾濫から 10 分の遅れを条件とした場合、北部から南部への経路はほぼ水没しているからである。このことから北部の住民の避難は北部に安全な場所を確保する必要があるといえる、



図 6.3.1 追加の避難場所と避難失敗経路の初期位置①

図 6.3.2 に黒丸で示した場所は北部でも比較的標高が高い場所である、しかしながらここに設置した場合でも、北部の半分の住民しか避難成功に至らなかった。北部では田畑が多くその中を通過する避難を行わない場合、結果的には南部の避難所が近くなるため、移動中に、迂回などを行う内に氾濫水と接触してしまうことが分かる。ただ、しこれはあくまで最も近い避難所に最初に向かいことを前提としたものである。そこで既定の避難所（小学校及び JA さが）への避難を行わず、追加の避難所へのみ避難を行った場合の検証結果を示す。



図 6.3.2 追加の避難場所と避難失敗経路の初期位置②

図 6.3.3 に示すように全ての住民を追加の避難所へ避難させた場合、非常に大きな効果を得た。北部の住民のみならず、南部の住民もほとんどが避難を完了した。この際南部から北部へは西部にある通路が優先的に使用された。唯一、浜川に沿った一部地域の住民が避難に失敗しているが、この地域は氾濫水の流入箇所直近で、CASE1 においては氾濫直後に避難しなければ避難できない地域である。



図 6.3.3 追加の避難場所と避難失敗経路の初期位置②（規定避難所なし）

図 6.3.4 に黒丸で示した場所は北部の中で住居が多い場所である。この場所に避難所を設置した場合大きな効果が得られた。しかしこの場所の標高は安全を確保できるほど高くはなく、浸水が予測される箇所でもある。この場所に避難所を設置する計画を検討する場合、現状より 1m ほど高い基礎を設置し、その上に避難所を設置する必要があるだろう。



図 6.3.4 追加の避難場所と避難失敗経路の初期位置③

ここまできをまとめると、避難所の設置によって北部の住民を避難せせるためには、北部に避難所を設置する必要がある。さらに、北部に設置しても予めその場所に避難するように決めておかなければより良い効果は得られず、ハザードマップや避難訓練などの住民への周知を利用して各々の向かうべき避難所を指示しておくことが重要である。

#### 6. 4 最短経路から見た避難計画

避難所は一般に学校や公共施設等に設定されるが、避難所の位置によっては初期位置から離れた場所であったり、迂回が必要であったりなどの理由で避難に失敗する場合がある。また高齢者になると長距離の歩行をできず、避難自体行わないこともある。そこで現状では通過できない箇所を道として整備し避難経路とする計画を模した検証を行う。

方法は通過手段の少ない北部と南部を分ける盛土を通り、各河川から中間の位置にある箇所にブランチを設置し避難成功者の増減をみるものとする。状況は前節同様 CASE 1 の氾濫から 10 分後の避難開始を想定した。

結果と追加ブランチの位置を図 6.4.1 に示す。ブランチの追加位置は盛土上にあり比較的標高が高いため、浸水から 10 分の状況においては比較的に安全に通過できる。結果としては追加ブランチにごく近い場所の住人が避難成功したのみでそれ以外は避難に失敗した。ただし、この地区は前節の北部に避難所を設置した場合でも南部への避難を優先した場合避難が成功しなかった地区で、このような場所からの避難は早期に行う必要があると言える。



図 6.4.1 追加ブランチと避難失敗経路の初期位置

## 6. 5 第6章の結論

この章では氾濫解析と避難解析から行う危険度評価の検証として簡易的な避難限界時間の算出、避難所や通路の増設による避難への効果検証を行った。その結果から避難計画に影響する以下のような結果を得た。

まず本対象地区においては南部より北部の避難優先度が高いこと、次に、その北部の住民を安全に避難するためには避難所の増設が有効であること、避難所の増設に加え、避難所からの移動距離を短くするような経路の確保が有効であること、さらに予め避難する場所を決める際、最近の位置が最も良いとは言えないことが分かった。

これらの結果は氾濫水により隔離されやすい地形の特徴や高潮対策事業の盛土より下流側に住居があるこの地域の特色ゆえに検証及び結果といえる。他の対象地区でも氾濫解析及び避難経路解析を行うことで、別の避難計画の作成における判断材料が示されるであろう。た、近年では垂直避難の重要性も注目されており、より実践的な避難計画を行う際には取り入れていくべきであろう。

参考文献

- (1) 内閣府：避難勧告等の判断・伝達マニュアル作成ガイドライン， p.5， 2014.

## 第7章 避難計画の作成

### 7.1 はじめに

前章までで鹿島市の浜地区を対象としたケーススタディとして氾濫解析、避難解析を行い、人的被害を軽減することを目的にした検討を行ってきた。ここではこれらを一般化し、今後の避難計画の参考になるような解説を行う。

避難勧告等の判断・伝達マニュアル作成ガイドライン<sup>1)</sup>によると、大規模な河川氾濫や高潮で床上浸水などが起こり家屋の安全が確保されない場合については立ち退き避難を要請するとある。それと同時に、家屋内の安全確保によって難を逃れることも避難の一つであることも平成26<sup>1)</sup>年発行のガイドラインで明記された。

そこで本章では避難を自主避難、勧告による立ち退き避難、屋内での安全確保（垂直避難）の3つに分けるものとする。

### 7.2 氾濫解析の材料

本研究で氾濫解析を行う目的は湛水状況、時々刻々の水深、流速の入手である。

氾濫解析を行う際に最低限に必要なものは水文データ（雨量、水位、流量）、地形形状、そして氾濫解析の計算環境である。より詳細な解析を行うには土地利用などが必要になるが、用いる計算方法に依存するためここでは割愛する。

この中で水文データは過去の自然災害の再現や今後起こりうる災害を想定したものなど目的に応じたものを作成する必要がある。入手には国土交通省<sup>2)</sup>が公開しているものなどが利用可能であろう。

また、氾濫解析を行う環境について、本研究ではDIHの販売するMIKEシリーズを用いたが近年ではiRIC Project<sup>3)</sup>など、無料で氾濫解析を行える環境ができつつある。このようなソフトウェアの使用により簡易的な流況を得ることが可能であると思われる。

地形形状に関しては本研究のようにレーザープロファイラによる高精度の地形データの使用が理想的であるが、GIS環境下では国土交通省国土政策局国土情報課の国土数値情報<sup>4)</sup>で公開されている「標高傾斜度5次メッシュ」や国土地理院の基盤地図情報データベース<sup>5)</sup>から入手できる建築物の外周線などを使用し大凡の地形再現が行える。

これらを用いて作成された建物の入口や通路の交差点における流速、水深の時系列データが避難解析の材料となる。また、湛水深の分布を作成することで氾濫

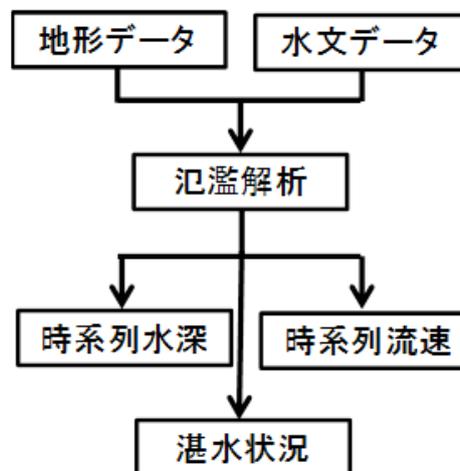


図 7.2.1 氾濫解析の材料と目的

危険個所の選定も可能である。

### 7.3 避難解析の材料

避難解析に必要な要素は第5章でも述べたが、簡易的に行う際にも必須なものはネットワークモデルと計算ソフトである。

このネットワークモデルはブランチとノードで構成され、ノードのデータを作成することでブランチのデータも作成できる。ノードの作成には座標データが必要であるが、この座標は平面直角座標系であることが望ましい。これによりノードを結ぶ長さがほぼ実距離となり、ブランチの作成が円滑となる。

計算ソフトに関して、本研究では Microsoft の Excel を使用しており、表 7.3.1 のようなブランチとノードの一覧や図 7.3.2 のような散布図を作成し、第4章で述べたような方法で算出された避難者の時々刻々の位置を表示した。

表 7.3.1 ノード・ブランチデータ

ノード番号	X座標	Y座標	ブランチ番号	上端	下端
1	-81590	11014.84	1	17	18
2	-81654.9	11078.99	2	18	19
3	-81769.7	11193.7	3	19	20
4	-81882.2	11308.04	4	20	21
5	-81500.8	11103.89	5	21	23
6	-81536.4	11196.84	6	23	22
7	-81620.8	11340.97	7	16	17
8	-81708.1	11423.69	8	16	19
9	-81843.3	11402.61	9	16	15
10	-81820	11373.05	10	14	15
11	-81862.4	11395.14	11	14	20
12	-81852.1	11432.85	12	14	13
13	-81888.7	11434.91	13	11	13
14	-81997.1	11555.67	14	11	9
15	-82057.4	11612.05	15	9	12
16	-82178.1	11589.02	16	12	77
17	-82385.5	11523.26	17	77	76
18	-82348.2	11484.95	18	76	75
19	-82316.3	11456.88	19	75	15
20	-82208.4	11346.39	20	22	24
21	-82143.8	11280.67	21	24	25
22	-82028.8	11167.41	22	25	26
23	-82084.9	11233.59	23	23	13
24	-81912.4	11050.56	24	9	10
...	...	...	...	...	...

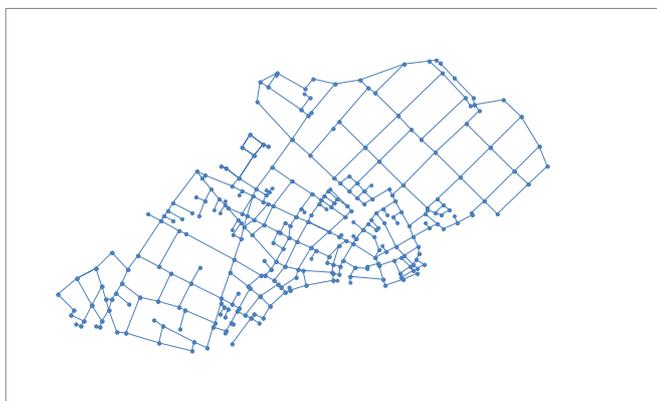


図 7.3.2 ネットワークの表示例

## 7. 4 避難の優先度の決定

前節のようなデータを入手・加工を行い、第6章で述べたような解析を行うことで想定した水害時に、住民が安全な避難を行えるかの判定を行うことができる。ここでは氾濫解析や避難経路解析を用いてどのような避難計画を行うかを述べてゆく。

近年、台風や豪雨の際、住民は避難行動の意思決定を行わない傾向にあり、避難開始を決定させる要因は自宅の床上浸水と直接的な避難指示である<sup>6) 7)</sup>。ただし、床上浸水が起こる状況では安全な避難を行えるとは言えないため、直接的な避難指示が有効な手段であると考えられる。しかし、避難指示を出す人員には限りがあるため、自助による避難を住民が行うためには予め避難を促すような指示が必要である。そこで氾濫の開始のタイミングを一つの基準として、それより早く避難を行わなければ安全避難ができない場所、ある程度の余裕をもって開始しても避難できる場所等の選出を行うことでこの避難の優先度の決定を行う。以下の流れで優先度を決める。ここでは避難の優先度を7段階に分け、優先度の数字が大きいものほど早期の避難が必要となる。

- A) 想定された氾濫の最終的な湛水深と比較を行い、自宅の浸水が想定されない場合、危険度は低い（優先度1）といえる。
- B) 氾濫と同時に全住民が一斉に避難した場合の避難失敗者の初期位置を算出する。
- C) Bの解析で避難失敗者が出た場合、氾濫より前に避難を開始した場合の計算を行う。
- D) Cの結果から猶予時間（河川の氾濫危険水位到達から決壊、越流までの時間、過去の水害などか決定）よりも早くに避難しなければ避難に成功しない場合、この場所は最優先に避難を行うべき場所であり、やむを得ない場合は車での避難も考慮すべき場所（優先度6）である。
- E) Cの結果、氾濫危険水位到達後の避難開始で避難が可能な場合はDの場所に次いで優先的に避難するよう予め指示を出すべき場所（優先度5）である。
- F) Aの結果、湛水が予想されるが、自宅やその周辺が歩行可能水深である場合、避難しない方が安全である（優先度2）。
- G) 残った場所は時間経過とともに自宅や避難経路が浸水するもので、経路に比べ自宅の浸水深が低いとき、逃げない方が安全であるといえる（優先度3）。しかし自宅より避難経路や避難所が安全な場合、早期避難を行うべきである（優先度4）。

この方法によって選定された優先度が高い場所ほど優先的に避難を行うべき場所である。図7.4.1にこれらの方法を模式図化したものを、図7.4.2に結果の例を示す。

ここでは予め避難を行うように指示を出す場合の優先度として分類を行ったが、これらはそのまま危険度と置き換えることもできる。即ち、終始浸水が起こらない場所は危険度1、氾濫によって浸水が起こるが歩行可能なレベルの場所は危険度2、時間経過に伴い避難ができなくなるが比較的自宅が安全な場所は危険度3、自宅より避難経路が安全な場所は危険度4、河川

の氾濫危険水位に達してから氾濫までに避難を行う必要がある場所は危険度 5、氾濫危険水位に達する以前に避難する必要がある場所は危険度 6 である。

この危険度は住民にも優先的に通知すべき情報で、ハザードマップを配布された場合一時的ではあるが住民は防災意識を高め、自らに及ぶ危険に対して意識を向けることが片田ら(2000)<sup>7)</sup>の調査から示唆されている。また、片田ら(1999)<sup>8)</sup>の別の研究で、多くの避難者が自動車で移動すれば被害の増大につながるが、制限を設けることでリスクの軽減が可能であることが示されている。危険度 6 の場所は歩行による避難を行う場合、氾濫危険水位に達する以前に避難が必要であり、それを越えた場合自動車での避難も必要になるだろう。

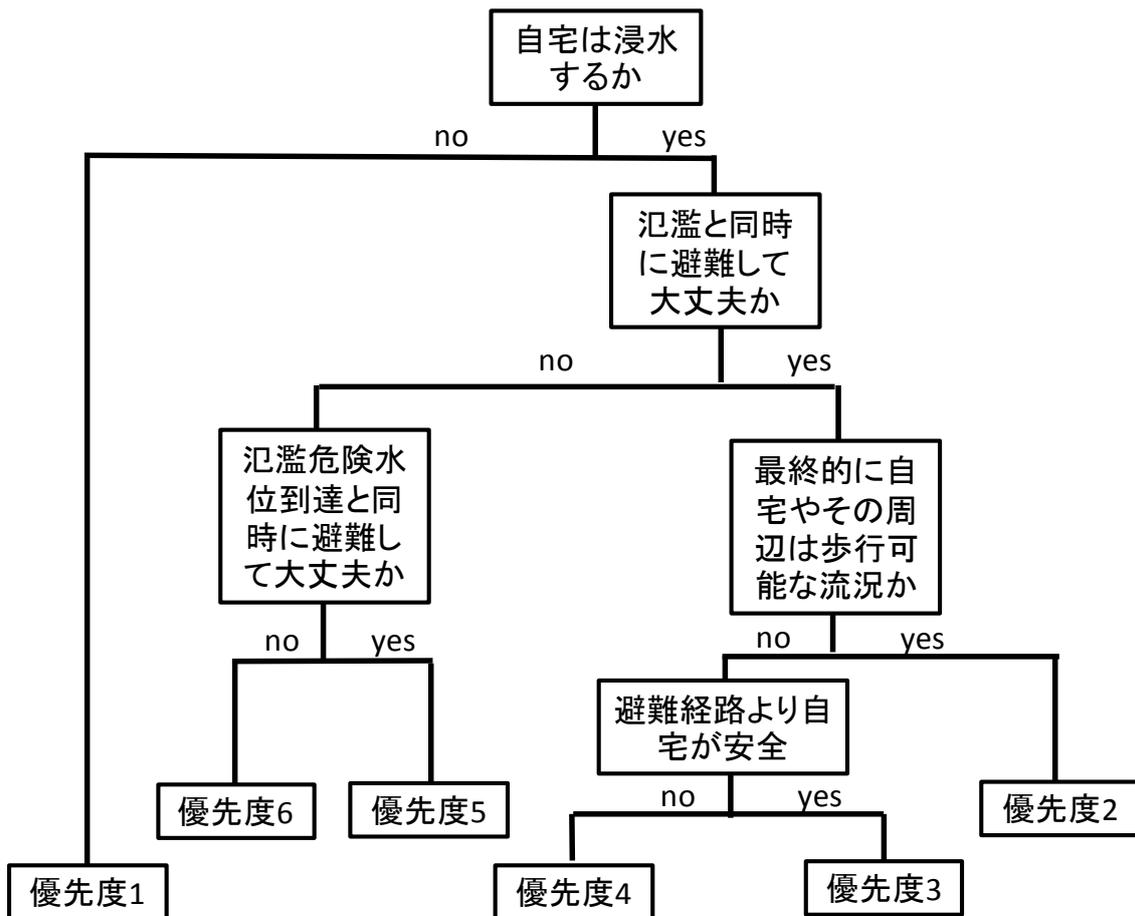


図 7.4.1 避難の優先度の選定方法

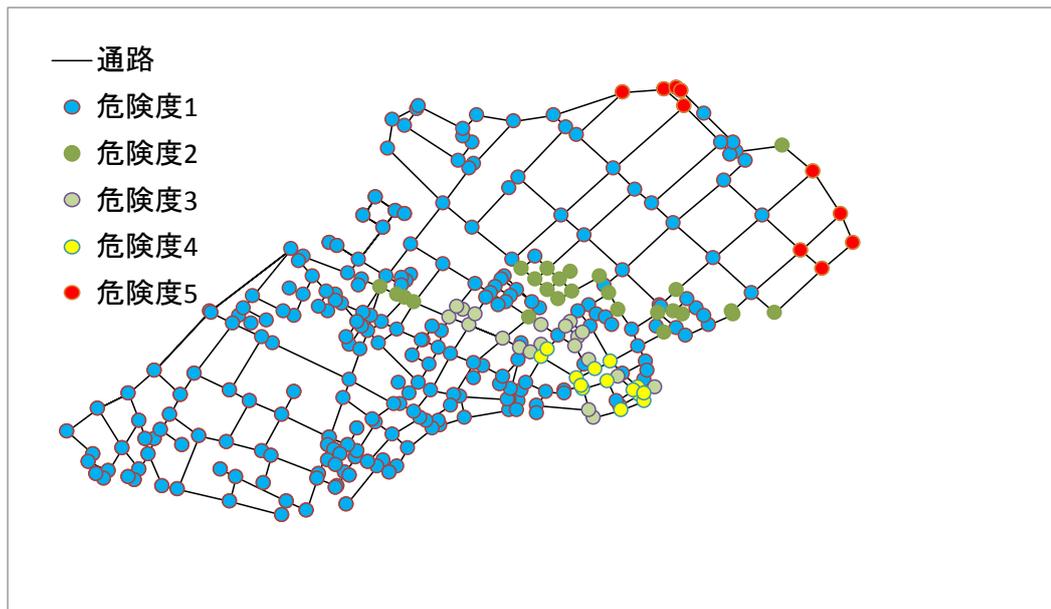


図 7.4.2 危険度評価の結果例

次に避難の優先度評価を参考にした避難計画の作成を試みる。条件として、以下のように避難を開始させた。

優先度 1：避難しない（屋内で安全確保を行う）

優先度 2：氾濫から 20 分後（計画案 A）、10 分後（計画案 B）に避難開始

優先度 3：氾濫から 10 分後（計画案 A）、5 分後（計画案 B）に避難開始

優先度 4；氾濫と同時に避難開始

優先度 5；氾濫から 10 分前に避難開始

優先度 6；該当なし

結果を図 7.4.3 に示す。優先度 5 の場所は氾濫前に避難を開始することで避難を行うことができた。優先度 2、優先度 3 の場所ではある程度の時間遅れを与えて避難を開始した。時間後れを多く見積もった計画案 A では優先度 2 の場所からの避難が間に合わない結果となった。ただし、前述のとおり優先度 2 の場所は歩行可能な流況で床上浸水にもならないような流況なので避難を行わない方が安全であるといえる。計画案 B ではすべての住民を避難させることができた。

このように自助による避難行動を行うように住民を促すことで豪雨の際の被害低減に有効であることが分かる。

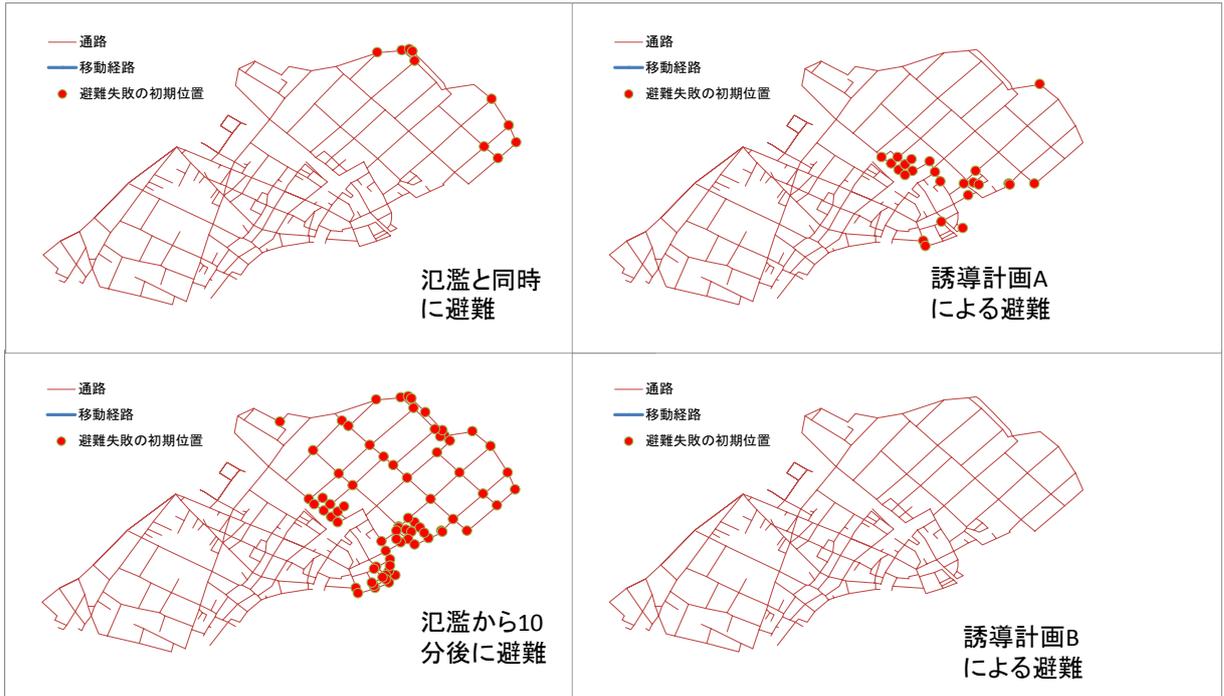


図 7.4.3 避難計画の採用結果

## 7. 5 避難所の位置に関する検討

避難所の位置は住民の避難開始の意思決定に影響を与え、特に高齢者は歩行による長距離の移動自体が大きな負担となり、避難を行わないケースもある。避難所として重要な要素は収容人数や設備など避難後の要素も重要であるが、ここでは避難所やその周辺の流況及び避難の容易さに着目する。

まず、避難所の流況評価は氾濫解析の結果を参照することで評価ができる。歩行による避難の目的地として想定されることから須賀ら<sup>10)</sup>のような歩行避難の可否による評価が望ましい。例として図 7.5.1 に第 3 章の CASE1 の条件で一度でも歩行不可能と判断された箇所を赤色で示した。この例では避難所の場所は危険な流況が観測され、避難のタイミング次第では避難中に事故に合う可能性がある。このようにして避難所の安全性を測ることができる。

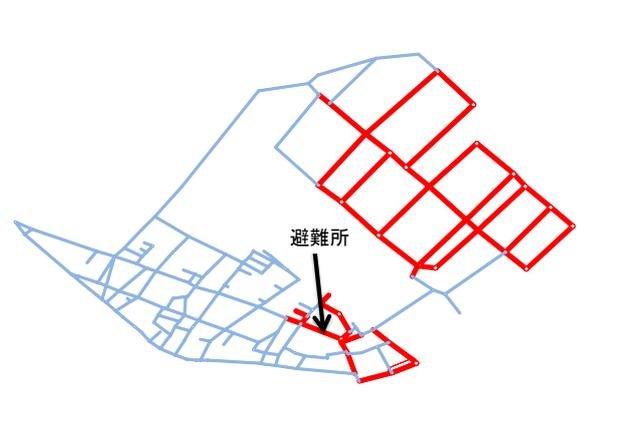


図 7.5.1 歩行不可能状態が観測される経路 (CASE1)

次に避難のしやすさについては歩行避難解析の結果として見る事ができる。理想的な結果としては避難を開始した住民の全てが避難所に到達することだが、氾濫の進行が進むと通過できない経路が増え、迂回や立ち往生が発生する。

このような事態を回避するためには新たな避難所の設定、増設が望ましい。その位置として考慮すべき要素は以下である。

- A) 図 7.2.6 のような氾濫解析による情報から判断し、周辺に歩行危険箇所が存在しない場所
- B) 既存の避難所のみを設置した避難解析を行い、避難できない可能性がある住民の住居に近い場所
- C) 増設により追加した避難場所がある場合、既存の避難所より移動距離が長くとも追加の避難所へ最初に向かうことで避難の成功につながる場合

A に関しては避難の途中にも氾濫は進行し、時間がたった状態で避難所周辺に到達し事故に合う可能性を減らすことにつながる。B に関しては避難の移動距離、時間は短いほどよく、単純に近い場所への避難ほどリスクが小さいことに起因する。

Cを含めこれらの方法は第5章の5.3で行った通りで、いくつかの場所を想定し検討を行い、住民の避難の方向性を検討する必要がある。

図7.5.2にこれらの方法を模式化したものを示す。

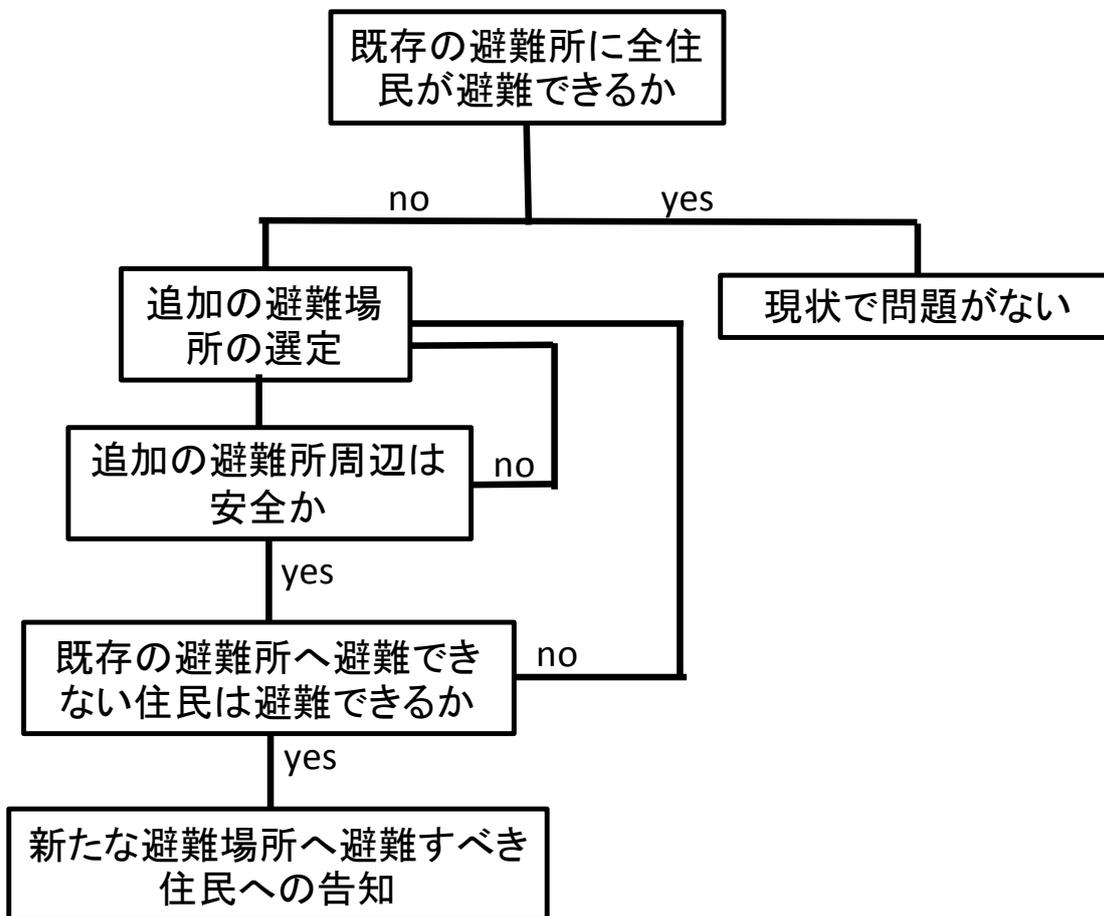


図 7.5.2 避難所増設位置の選定方法

## 7. 6 第7章の結論

この章では前章までに行った氾濫解析，避難解析による危険度評価による知見を参考に実際の避難計画の作成を試みた．はじめに各エリアの危険度評価を行った．それにより水平避難が必要な場所，垂直避難が有効な場所について分類がなされた．また氾濫開始以前または河川の氾濫危険水位到達以前に避難を開始すべき場所の抽出を行い，基本的には推奨されない自動車での避難の可能性についても示唆された．またハザードマップなどでは危険度評価や経路を示しているが，避難解析により鉛直避難や迂回，早期避難の推奨などに提言することもできる．このような危険度評価を基準とした避難計画の作成は今後の避難計画作成において多様な避難方法の選択につながると考えられる．

## 参考文献

- (1) 内閣府：避難勧告等の判断・伝達マニュアル作成ガイドライン， p.5， 2014.
- (2) 国土交通省 水文水質データベース.  
<http://www1.river.go.jp/>
- (3) iRIC Project  
<http://i-ric.org/ja/>
- (4) 国土交通省国土政策局国土情報課 国土数値情報.  
<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>
- (5) 国土交通省国土地理院基盤地図情報データベース.
- (6) 牛山素行・今村文彦・片田敏孝・吉田健一：高度防災情報時代における豪雨災害時の住民行動，水文・水資源学会誌， 17， pp.150-158， 2004.
- (7) 片田敏孝・児玉 真・荻原徳：河川洪水に対するリスク・イメージとその避難行動への影響，河川技術に関する論文集， 第 6 卷， pp.261-266， 2000 年 4 月.
- (8) 片田敏孝・及川康・杉山宗意・浅田純作：パネル調査に基づく一関市洪水ハザードマップの評価，土木計画学研究・講演集， Vol.22， No.1， pp.163-166， 1999.
- (9) 片田敏孝・桑沢敬行・渡邊 寛津波襲来時における自動車避難と人的被害の関係に関する一考察，日本災害情報学会研究発表大会予稿集， 14th， pp.152-155， 2012.
- (10) 須賀堯三・上阪恒雄・吉田高樹・浜口憲一郎・陳 志軒：水害時の安全避難行動(水中歩行)に関する検討，水工学論文集， 第 39 卷， 1995,2.

## 第8章 結論

本研究では洪水・高潮両面からのリスクを負っている低平地にて如何に避難行動を行うべきかについて把握するために、氾濫解析、避難解析の両方を用いて地形上、避難上の急所となる個所の抽出を行い、ハザードマップによる湛水深とは違った目線の危険度判定を行った。

第4章にてこの研究で入手すべき道路網の湛水深を効率よく入手することに重点を置いたモデルの作成を行った。計算の基礎式や方法などは従来数多くの研究者が行ったものと大きな違いはないが、本研究では必要のない部分については粗い格子を与えて避難計画において重要な通路の特徴を得られるような格子を作成した。

また、ここでは従来の研究にあるような所謂最も発生確率の高い水害のみに着目せず、多くの水害を想定して、それぞれの被害軽減を行えるような計画を立てるようにした。

結果として、すべてのケースの浸水危険個所を内包した地図の作成を行い危険個所の可視化を行った。

第5章にて氾濫解析との接続を行い、時々刻々の湛水に対応した避難解析を行った。ここでは避難所への到達を目的とした場合を想定し、避難に失敗する経路とその視点と終点を示すことで、各災害が発生した場合の避難の可否を示した。これにより各場所の住民にとってどの災害が脅威となりやすいか、災害の発生が予測された場合、どこの住民に優先的な避難誘導を行うべきか等の検討を行えることを示した。また被害の特徴を氾濫水接触と避難所到達不可能に分け、前者の避難はより優先的に行うべきであることも示した。

第6章で避難計画の判断材料となるような情報の作成を試みた。ここでは避難限界時間、避難所増設の検証及び避難先決定の重要性、道路整備による経路の短縮を行った。結果として避難所の増設が最も有効で、距離にかかわらず浸水予測を参考にした避難所をあらかじめ決めておくことが重要となった。最終的には災害発生直後に一部の地域から避難所へ向かえず孤立する場所があるといった埋め立てによる低平地沿岸部の有りがちな特徴がある地域の安全上の課題主な判断材料となった。

最後に第7章では第5章で行った検証やその結果を参考にして実際に避難計画の一部を作成した。その際、これまで鹿島市浜地区で行ったケーススタディから、他の地域でも用いられるように、比較的入手が容易なデータ、方法を模索して解説を行った。

また、本研究では住民のモデルを単純なもので検証を行ったが、住民の個人差や心理的な情報による避難への影響などは避難に大きく影響すると思われ、今後行われる研究で課題となってゆくだろう。

この研究により一般的に行われている氾濫解析によって作成された水深による危険度評価に、避難経路の危険度評価を加えることで、一般的なハザードマップにあるような危険個所の明示に加え、鉛直避難の可能性や避難の迂回や直近以外の安全な避難所の選定など、避難の多様性に目を向けることができるようになると考えられる。

最後に、本研究で行った手法により氾濫解析及び避難解析を行うことは避難計画を作成する上で有効な手法となりうることを示すことができたと考える。現在多くの自治体でハザードマップの作成が行われているが、河川改修や区画整理が行われた後も更新されない場合がある。都市の開発に追従して必要な避難計画も変更されるべきであり、今回の避難解析のように公に無料公開された比較的入手が容易な情報から行える本研究の避難解析は有効であると考えられる。本研究が今後の避難計画やそれに関連する研究の参考になることを期待して結びに変わるものとする