

博 士 論 文

洪水氾濫区域における被害軽減のための
非構造的な洪水対策に関する研究

STUDY ON
NONSTRUCTURAL COUNTERMEASURES FOR
FLOOD DISASTER MITIGATION IN ASSUMED
INUNDATION AREA

2014 年 7 月

田中 耕司

立命館大学審査博士論文

洪水氾濫区域における被害軽減のための
非構造的な洪水対策に関する研究

STUDY ON
NONSTRUCTURAL COUNTERMEASURES FOR
FLOOD DISASTER MITIGATION IN ASSUMED
INUNDATION AREA

2014 年 7 月
July, 2014

田中 耕司
Kohji TANAKA

主査： 里深 好文教授

Principal referee : Professor Yoshifumi SATOFUKA

論文の概要

従来から我が国においては、河川流量のピークを低減させるためのダムや、洪水を堤内地に氾濫させないための堤防といった施設が整備されてきた。また、堤内地に二線堤を築いたり、遊水地を設けることによって洪水の一時貯留をおこない、氾濫の拡大を防いできた。その一方で、近年、局地的な集中豪雨、台風性や前線性の豪雨が各地で多発し、現状の河川整備基本方針の基本高水流量を超えるような洪水が発生する事態もまれではなく、内水氾濫や外水氾濫の拡大や土石流等による犠牲者が増加している。また、地球温暖化による気候変動に伴う、洪水流量の増加も懸念されている。このような背景から、流域の気象・水象観測網の整備、雨量・河川水位の情報配信、ハザードマップや防災教育・訓練といった非構造的な洪水対策が国・都道府県・市町村において推進されている。

本論文は、洪水による被害を軽減するための非構造的な洪水対策について実務上の課題を明らかにするとともに、その解決策を示すものである。論文の前半では、滋賀県長浜市、米原市、高島市を対象地域として、人的被害の発生が想定されている地区において、行政と住民の避難判断と行動のあり方について洪水氾濫解析をツールとして議論している。また、後半では、地方自治体の避難勧告・指示や水防活動を行う際に効果が期待できる手段として、河川水位予測システムの高精度化や、堤内地における洪水氾濫予測システムを用いた氾濫原管理について検討している。

本論文は、以下に示す 10 章で構成されている。

第 1 章では、本研究の位置づけおよび目的について記述している。第 2 章では、滋賀県の姉川・高時川流域で想定された洪水に対して、行政からの防災情報が住民に届き、かつ適切な避難判断・行動がとれるか否かについて 2 回の災害訓練で確認した。その結果、初回の災害訓練では、自主防災組織、社会福祉団体の避難判断及び行動が大幅に遅れることがわかった。2 回目の訓練では、社会福祉団体の避難方法としては、建物の 2 階以上に段階的に避難することが、最善の策として提示された。さらに、垂直避難を前提とした行政と住民との連携において解決すべき課題を抽出した。第 3 章では、これらの課題の中で特に重要となった、行政が持つべき避難判断基準の作成方法を新たに提案した。堤内地の内外水氾濫結果から評価された、浸水リスク（人的被害・歩行困難）に応じた避難勧告・指示の発令基準を、小学校区単位で設定する方法について具体的に示した。第 4 章では、洪水予報河川に指定されていない中小河川群からの氾濫や堤内地の内水氾濫を解析することによって、避難勧告等の発令基準や、それと連動する住民の避難準備や水平・垂直避難の目安となる基準を作成した。第 5 章では、姉川の氾濫によって人的被害の発生が想定される地区として米原市村居田地区を対象に、行政と住民の協働を基本とした非構造的な洪水対策の実施過程についてとりまとめた。地区内での二次指定避難所の変更や防災マップの作成など、複数回の議論の中で、氾濫リスクの開示を基本としたリスク・コミュニケーションや、リスクマネジメントの時間的なサイクルの重要性について示した。

近年、流域内の雨量・水位情報、レーダ雨量などの情報が 10 分程度で取得できる河川観測網が整備されてきた。河川管理者は、これらの情報を活用して、迅速に洪水予警報を発令するための洪水予測システムを整備し、地方自治体や住民に対してリアルタイムの洪水情報提供を行っている。本研究の後半部分では、洪水予測モデルの精度を向上させるためのデータ同化の適用性、水位予測システム、洪水氾濫予測システムについて、

それぞれ検討している。

第 6 章では、吉井川水系洪水予測モデルの精度向上を図るために、従来のフィードバック手法と非線形フィルタリング手法を適用した結果についてとりまとめている。さらに、他の流域への洪水予測システムの拡張を図るために、システムの構成や汎用的なサブシステムの設計および構築方法についてとりまとめた。第 7 章では、武庫川流域を対象に、水位予測システムに非線形フィルタリング手法を適用することによって、水位予測精度を向上できることを示した。さらに、予測雨量の誤差分布が二変数指数分布で近似できることを示すとともに、現時刻から将来の水位を確率的に表現できる方法を提案した。第 8 章では、淀川支川木津川・宇治川・桂川の合流前後の区間における複雑な水位変化を予測するために、粒子フィルタを導入し、その高い適用性を確認している。第 9 章では、洪水予測システムによる予測水位・流量のデータを利用して、九頭竜川の氾濫原管理に資する内水外水氾濫を表現する水理モデルとその適用性について検討した。さらに、情報提供を支援する WEBGIS を基本とした洪水氾濫予測システムの設計・構築の内容についても示している。第 10 章では、本論文で得られた成果をとりまとめるとともに、今後の研究課題について言及した。

田中 耕司
2014 年 3 月

Title of Doctoral Thesis

STUDY ON NONSTRUCTURAL COUNTERMEASURES FOR FLOOD DISASTER MITIGATION IN ASSUMED INUNDATION AREA

Abstract

In Japan, dikes and dams have been conventionally maintained as facilities to control river discharge and to prevent the inland from flood disasters under fundamental river management policies and river improvement plans. Moreover, overflow levees and retarding basins prevent or mitigate flood disasters by expanding the flooding flow. On the other hand, in recent years, front-related heavy rain, typhoon-related heavy rain, and local heavy rains have occurred frequently. These heavy rainfalls may rarely exceed the rainfall and flood discharge designed by a river improvement plan, however, there is concern that flood discharge may increase because of climate change due to increased global warming. Against such a background, MLIT (the Ministry of Land, Infrastructure, Transport, and Tourism) prefectures, and municipalities have pushed for nonstructural flood countermeasures such as the maintenance of the observation network of basins, distribution of information about precipitation, river water levels, hazard maps, disaster prevention education, and disaster drills.

This study clarifies the problems and solutions of nonstructural flood countermeasures to reduce damages caused by floods. In the first half of the study, the problem of nonstructural flood countermeasures to reduce flood damage are discussed. This will include the judgment criteria of evacuation that administrations and residents should put into practice for the concrete field area, which includes the cities of Nagahama, Maibara, and Takashima in Shiga Prefecture. The latter half of the study includes the design and construction of a highly precise flood forecasting system and flood flow forecasting system of river water levels and expanding flooding flow to carry out evacuation judgments and flood-fighting activity efficiently for disaster mitigation.

This thesis consists of ten chapters, as shown below.

Chapter 1 contains a description of the positioning and purpose of this study.

Chapter 2 shows the problems and solutions of evacuation judgment and activity. It uses information from a disaster drill on the inundated assumption map in River Ane and Takatoki in Shiga prefecture to confirm that disaster prevention information announced by the administration reaches residents. In the first disaster drill, the voluntary disaster prevention organization and the social welfare group knew the evacuation judgment and activity were late for the assumed flood. By the second disaster drill, the social welfare group which had a person with a physical disability and a bedridden elderly person chose progressively to evacuate more than the second floor of the building when the flood caution and warning was announced by the river administrator. These drills extracted issues of disaster mitigation that should be settled in the collaboration between the administration and inhabitants.

Chapter 3 includes a suggested new method for developing evacuation judgment criteria, a problem revealed as one of the important issues in Chapter 2. These criteria can be put into practice by municipal officials. The chapter also includes an evaluation of the inundation risk in the flood plain based on the flooding analysis results, and a concrete method for setting the announcement criteria for an evacuation advisory and instructions based on the risk evaluation in the precinct of the elementary school.

Chapter 4 has the evacuation judgment criteria created by analyzing the flooding from the small and medium sized river groups. The object of this chapter is evacuation judgment criteria for river and flood plains not part of the flood forecast river in the Flood Fighting Act.

Chapter 5 contains a description of the enforcement process of nonstructural countermeasures based on the collaboration of administrators and residents in Muraida in Maibara city, a district where the Ane River would create damage to human life and structures. The process showed that residents can recognize the flood risk through risk communication with administrators. Because nonstructural countermeasures assume an evacuation, the administrators and residents had a collaborative disaster drill; the evacuation judgment criteria became common knowledge as did a map showing the flood risk and evacuation route. This showed it was possible to confirm or reconfirm the criteria by executing the temporal cycle of risk management in this process.

The Japanese river observation network is maintained to acquire information such as precipitation, the water level, and the radar precipitation in about ten minutes. The river administrator uses the flood forecasting system and flooding prediction system to announce flood warnings for people along these rivers quickly local government and residents in the flood areas also contribute information. The latter half part of this study describes the application of the data assimilation to improve the precision of the flood forecasting model, as well as, the design of the flood forecasting system and the flood flow forecasting system.

In chapter 6, it was showed that the precision of the flood forecasting model of the River Yoshii basin has been improved by applying Particle Filter as one method of the data assimilation based on non-linear filtering technique. The several sub-systems(database, communication facility with the system concerned, arithmetic function, display function of the browser) in the flood forecasting system of the River Yoshii basin were designed to become frequent use to be applicable to other basins.

Chapter 7 contains the new flood forecasting system with a distributed runoff model in consideration of an error in the predictive precipitation. A two-variation exponential distribution accounts for the distribution of the errors between observed and predicted precipitation. The flood forecasting system incorporates an accommodative high particle filter to a non-linear phenomenon as a data assimilation method for observational data. When applied to three actual floods, the observed water surface level entered the confidence interval of the prediction for 3 hours; this indicated a system approaching sufficiency. A method that could express a predicted water level was suggested stochastically by these results.

Chapter 8 describes a flood forecasting system comprised of a distributed runoff model and a one-dimensional hydrodynamic model for the whole Yodogawa water system using the data assimilation technique for the real-time observed water level by the particle filter. The data assimilation technique allows the observed water level perform a fitting of the forecast of the one-dimensional hydrodynamic model. The chapter includes an inspection of the compatibility with the results of the model and the real flood data. The results of judging the prediction data with Nash values and RMSE show extremely precise correlations.

Chapter 9 includes descriptions of the issues of architecture and structure of the real-time flood flow forecasting system developed to support evacuation judgment and action, flood fighting, and flood prevention activities during a flood event. Flooding flow in inundation area was automatically computed in this system. This system gave effective information to residents in the inundation area. The system includes custom-built user-interfaces for residents and municipal officers integrated with WEB GIS.

Chapter 10 concludes the results of this study. It also contains several themes for future research.

Kohji Tanaka
March, 2014

次

第 1 章 序論	1
1.1 近年の災害の特徴と防災対策	1
1.1.1 豪雨による災害の特徴の変遷	1
1.1.2 防災対策の現状と課題	10
1.2 本研究の目的と構成	22
1.2.1 本研究の背景と枠組み	22
1.2.2 本研究の構成	28
参考文献	32
第 2 章 洪水氾濫を想定した避難計画策定における課題と解決策	38
2.1 はじめに	38
2.2 対象とする流域の概要	39
2.2.1 対象流域の概要	39
2.2.2 浸水想定区域図による氾濫特性とその課題	40
2.3 要援護者等に対する広域避難所への避難誘導・行動の課題抽出	42
2.3.1 破堤シナリオの設定	42
2.3.2 図上訓練の概要	49
2.3.3 参加者の災害対応とその考察	51
2.3.4 課題の抽出と解決策	52
2.4 第一回の反省を踏まえた要援護者施設の避難行動	54
2.4.1 第一回図上訓練との相違点	54
2.4.2 氾濫シナリオの設定	54
2.4.3 図上訓練の概要	56
2.4.4 立場毎の対応結果	60
2.4.5 広域避難計画	62
2.5 避難計画策定に向けた課題と解決策の体系化	64
2.5.1 要援護者に対する避難支援体制	64
2.5.2 広域避難の対応策	65
2.5.3 課題と解決策の体系化	67
2.6 おわりに	73
参考文献	74
第 3 章 洪水予報河川の氾濫原を対象にした避難勧告等の発令基準 の設定に関する研究	75

3.1 はじめに	75
3.2 危険箇所の水理特性と防災上の意義.....	76
3.2.1 危険箇所の把握.....	76
3.2.2 危険箇所を利用した防災情報の充実.....	78
3.3 氾濫特性	78
3.3.1 氾濫解析の概要.....	78
3.3.2 氾濫特性の把握.....	78
3.4 避難勧告等の発令基準の設定	80
3.4.1 避難判断の考え方	80
3.4.2 人的被害リスク区域の把握.....	81
3.4.3 地区別における避難判断基準.....	94
3.5 おわりに	102
参考文献	103

第 4 章 中小河川群の氾濫原における地区別避難判断基準に関する研究 ----- 104

4.1 はじめに	104
4.2 氾濫解析	105
4.2.1 水理解析モデル.....	105
4.2.2 外力の設定.....	106
4.2.3 破堤条件.....	106
4.3 対象流域の氾濫特性.....	111
4.3.1 対象流域.....	111
4.3.2 氾濫特性の把握.....	111
4.4 中小河川群を対象にした地区別避難判断基準の設定の考え方	116
4.5 地区別避難判断基準の設定	117
4.5.1 地区別避難判断基準の設定方法	117
4.5.2 内水氾濫に対する基準の設定	117
4.5.3 内外水氾濫に対する基準の設定	119
4.6 おわりに	123
参考文献	124

第 5 章 洪水氾濫によって人的被害の発生が想定される地区を対象にした防災・減災対策の適用に関する研究 ----- 125

5.1 はじめに	125
5.2 対象流域の概要.....	126
5.3 対象地区の氾濫特性と洪水対策の課題	127
5.3.1 浸水想定区域図と洪水予報河川	127

5.3.2 村居田地区の水害リスク評価	128
5.3.3 氾濫を想定した場合の洪水対策上の課題	131
5.4 洪水対応の実施までのプロセス	131
5.4.1 協議会が中心となったワーキングの実施	131
5.4.2 ハード対策の要望とその対応	132
5.4.3 防災情報の課題と対応	133
5.4.4 備える対策への協働	133
5.4.5 WGにおけるリスク・コミュニケーションのプロセス	139
5.5 おわりに	141
参考文献	143

第 6 章 吉井川水系を対象にした洪水予測システムにおけるデータ 同化手法とダム操作支援を反映したシステム構築 ----- 144

6.1 はじめに	144
6.2 対象流域の概要	145
6.3 洪水予測モデルの適用	146
6.3.1 分布型流出モデルの概要	146
6.3.2 分布型流出モデルの同定	148
6.4 洪水予測におけるフィードバック手法の開発	160
6.4.1 改良誤差上乘せ法	160
6.4.2 粒子フィルタ法	161
6.5 ダム操作に配慮した洪水予測システムの構築	170
6.5.1 洪水予測モデル	170
6.5.2 ダムの洪水調節操作モデル	170
6.6 ダム放流操作支援システムの開発	173
6.6.1 システム構成	173
6.6.2 外部システムとのデータ連携	173
6.6.3 予測計算機能および計算実行部	175
6.6.4 ダム操作支援のためのシミュレータ機能	178
6.6.5 データ・ベース	180
6.7 おわりに	181
参考文献	182

第 7 章 洪水予測システムにおける Particle Filter の適用性と予測雨 量の誤差分布の特性を考慮した確率水位予測に関する研究 ----- 183

7.1 はじめに	183
7.2 水位の確率分布を予測するモデルの概要	184

7.2.1 水位予測システムの概要	184
7.2.2 分布型流出モデル	184
7.2.3 粒子フィルタ	186
7.2.4 予測雨量の誤差分布	186
7.3 雨量の予測誤差分布	186
7.3.1 分布関数	186
7.3.2 3 時間先までの予測雨量と実績雨量の関係	187
7.3.3 データ変換と定数の設定	187
7.3.4 誤差分布の考察	188
7.4 水位予測モデルの構築	191
7.4.1 粒子フィルタ	191
7.4.2 現時刻における水位の誤差分布の算定方法	191
7.4.3 粒子フィルタの基礎式	192
7.5 河川水位の確率予測結果	193
7.6 おわりに	200
参考文献	201

第 8 章 非線形フィルタリングを適用した淀川三川合流区間における水位予測システムの開発 ----- 202

8.1 はじめに	202
8.2 淀川水系洪水予測モデルの概要	203
8.2.1 分布型流出モデルの適用	203
8.2.2 洪水予測システムの構築	205
8.2.3 不定流モデルの構築	205
8.3 Particle Filter の適用	209
8.3.1 時間更新, 観測値更新ステップ	209
8.3.2 リサンプリング	210
8.3.3 システムノイズの追加	210
8.3.4 Particle Filter の時間更新, 観測値更新ステップおよびリサンプリングの概念	211
8.4 流量および水位の予測方法	212
8.4.1 枚方地点の流量の予測方法	212
8.4.2 枚方地点上流の水位の予測方法	213
8.5 実績洪水の解析	214
8.5.1 現時刻におけるフィルタリング	214
8.5.2 現時刻からの予測水位の解析結果	216
8.6 おわりに	221
参考文献	222

第 9 章 防災体制支援を目的とした九頭竜川流域のリアルタイム洪水氾濫予測システムの開発 -----	223
9.1 はじめに	223
9.2 洪水氾濫予測システムの開発方針	224
9.2.1 洪水氾濫予測システムの開発における基本方針	224
9.2.2 水防・防災体制と本システムの関連性	224
9.2.3 洪水氾濫予測モデルの適用	227
9.2.4 避難行動の支援	227
9.3 洪水氾濫予測モデルの構築	227
9.3.1 対象流域の概要 16)	227
9.3.2 洪水氾濫予測モデルの構成	230
9.3.3 洪水予測モデルの概要	231
9.3.4 河道モデルの概要	231
9.3.5 外水氾濫モデルの概要	234
9.3.6 内水流出・氾濫モデルの概要	245
9.3.7 堤内地内の降雨・湛水モデルの概要	247
9.4 洪水氾濫予測モデルの検証	250
9.4.1 洪水氾濫解析の検証条件	250
9.4.2 モデルの検証	252
9.5 洪水氾濫予測システムの開発	263
9.5.1 システムの全体構成	263
9.5.2 外部通信システム	267
9.5.3 計算実行システム（氾濫解析実行システム）	269
9.5.4 計算条件編集システム（破堤開始時点からの氾濫予測解析）	273
9.5.5 情報提供システム	278
9.5.6 防災活動・避難行動支援システムの機能	281
9.5.7 計算結果データベースシステム	288
9.6 システムの開発	292
9.6.1 開発言語	292
9.6.2 サーバの構成	292
9.7 おわりに	294
参考文献	296
 第 10 章 結論 -----	 298
10.1 本研究で得られた成果	298
10.2 今後の研究課題	303
 謝 辞 -----	 307

第 1 章 序論

1.1 近年の災害の特徴と防災対策

1.1.1 豪雨による災害の特徴の変遷

近年の台風や集中豪雨に伴う異常なまでの降雨量や降雨強度により、河川の氾濫や土石流・地滑り等の発生が毎年発生しており、流域内の資産の損失のみならず多数の人命も失われている。このような災害を引き起こす気象現象は、温暖化の影響による日本近海の海面温度の上昇によって台風の発生位置を北上させるとともに、強いあるいは非常に強い勢力を維持しながら、日本列島に直撃するという今までに考えられなかったことが発生している。また、局地的な豪雨については、1 時間に 100mm を超える非常に強い雨が毎年のように観測されている。

このような気象現象がもたらす降雨による災害に対応した治水対策は、戦後から計画され、洪水防御という観点を中心にそのための施設（ダム、遊水地、河道改修）が整備されてきた。その結果、図 1.1.1 に示すように現在の治水整備率は、国土交通省のデータによれば超過確率 30～50 年規模の洪水には耐えうる施設整備が概ね 60%程度完了している¹⁾。しかし、言い換えると、河川整備基本方針や河川整備計画での対象規模である超過確率 100 年～200 年規模に対する洪水防御施設の整備はまだ完了していない。さらに、都道府県が管理している一級河川内の指定区間や二級河川の治水整備率は、直轄区間よりも低い。

このような従来から営々と実施されてきた河川整備は、1959 年の伊勢湾台風での数千人を超える犠牲者を現在では年間 100 人程度まで軽減させたことは、計画に基づ

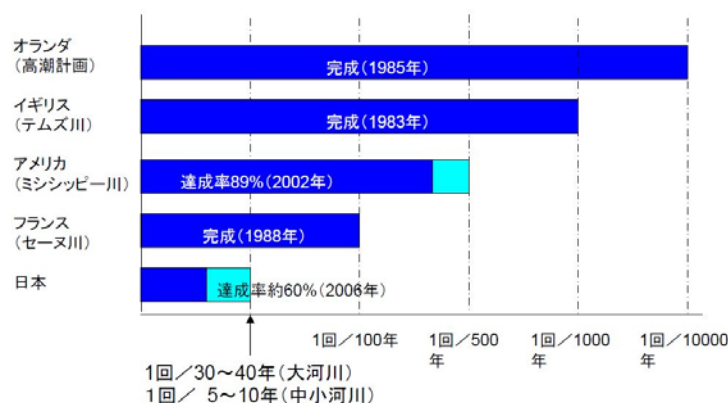


図 1.1.1 日本における治水整備率とその達成率¹⁾

く施設効果として評価されるべきことである。しかし、ここ 10 数年の豪雨による被害の状況を捉えると、従来の河川の中で洪水を抑え込むダム・遊水地・河道改修といった整備だけでは、洪水防御での人的被害をゼロに近づけることは不可能であると考えざるを得ない。

都市部の人口密集地である市街地周辺の水害・土砂災害の問題がクローズアップされた長崎大水害点から 2011 年までの災害について被害やそのときにクローズアップされた問題について整理してみよう。

(1)長崎大水害

1982 年 7 月 23 日（昭和 57 年）の長崎大水害は、時間雨量 187mm という記録的な豪雨であったとともに、3 時間雨量 315mm、日雨量 500mm を越す集中豪雨によるものであった。この集中豪雨は、死者・行方不明者は 299 人、被害総額 3,150 億円、住家の全壊・半壊 1,580 棟、床上浸水 17,907 棟という甚大な被害をもたらした。死者・行方不明者の 90% 弱の方は、土石流・斜面崩壊による土砂災害によるものであった²⁾。

この災害での課題として、土地利用の厳しい長崎では、斜面市街地の防災対策とまちづくりがクローズアップされた。さらに、災害当日は、行政から住民への防災情報や避難勧告などの防災体制が執れなかったことが、防災体制上の課題が明らかになった。これに鑑み、災害に強い総合的な都市づくりをするためにハード・ソフト両面からの防災都市構想が検討され、1984 年 3 月に提言として、治水対策・斜面对策・都市整備・交通体系および防災体系に対する答申がまとめられた³⁾。この災害後の対策として、土地利用変更の規制や防災調整池の義務づけといった構造的対策と、警戒避難の観点からハザードマップの作成と公表が行われている。さらには、流域内の水位・雨量の情報をリアルタイムに情報提供するシステムの整備が行われている。このようなハード対策とソフト対策を両面から具体的に推進していった事例を教訓として以後の都市災害に対する防災体制の整備が粛々と全国に広がったことは言うまでもない。

(2)東海豪雨による都市部の脆弱性

2000 年（平成 12 年）9 月 11～13 日に、東海地方から四国地方にかけて台風 14 号が秋雨前線の活動を活発化させ、大雨をもたらした。特に名古屋市では、11 日で 425mm の降水量、24 時間最大降雨量が 534.5mm に加えて 1 時間最大降雨量 93mm を記録した。これは、過去の記録の倍もの降雨であり、当然ながら東海地方にかけて甚大な被害をもたらされた。この災害は、死者・行方不明者 10 人、負傷者 98 人、家屋全半壊および一部破損 312 棟、さらには床上浸水家屋 2 万 7180 棟、床下浸水家屋 4 万 4111 棟であり、庄内川、新川、天白川の外水氾濫による影響が非常に大きかった。長崎大水害とは異なり、社会インフラの影響、日本を代表する都市部の災害であったため、一般資産被害額は約 8,400 億円にも上がっただけでなく、公共土木施設被害等で 292 億円となり、都市で水害になった場合の甚大さを思い知らされた結果となった⁴⁾。しかし、この災害後に被害の甚大さだけでなく、洪水時の行政ならびに住民側の危機管理意識の問題が浮上した。この洪水での時間的な経過の中で、国土交通省の発令する洪水予警報は適切に報じられていたが、周

辺市町村における洪水に対する事前の状況想定に基づく危機管理ができていなかったために、避難勧告等の発令などが住民への情報提供が、全て後手に回ったことが報告⁴⁾されている。さらに、高齢者の問題について焦点を当てると、高齢者のみの世帯では、子供との同居者に比べて1時間程度の避難行動の差があること、家財保全活動もしようと思ったが結果できなかったという世帯があり、避難や被害軽減行動が困難であることも報告⁵⁾されている。また、片田ら⁵⁾は、住民側の危機管理の希薄さとして、身の危険を感じなかった人が50%、感じていた人が30%であり、行政からの避難勧告も住民が危機意識を持ち、避難行動に結びついていないことを指摘している。加えて、住民は行政からの指示待ち状態であり、行政に自分の行動や命を委ねている傾向にあることを指摘している。これは、これまでの防災行政に原因があることも指摘しており、このような住民と行政双方に災害時の危機意識の違いがある限り、さらにはハザードマップの整備や情報伝達手段の整備をしたとしても受け手の住民側の意識が変わらない限り、ソフト対策の効果は期待できないことを問題提起している。

この災害は、近年の洪水に対する以下に示す事前対応、発災時対応、復旧・復興対応⁴⁾に関する様々な問題を突きつけ、最近までの洪水や土砂災害を含めた対応に対する国家的な取り組みにつながった災害ともいえる。

この災害を契機として、国土交通省河川局および都市局は、『都市型水害緊急検討委員会』を設置し、委員会の提言をとりまとめている⁶⁾。この提言の中で取り組むべき柱として「水災対策の基礎調査、影響予測」「水災危機管理、被害軽減」「水災時の情報提供等」「河川、下水道等の整備」「治水システムの新たな展開」の5つについてまとめられている。この提言の中で、洪水に対する以下に示す危機管理のあり方と、ソフト対策の必要性が論じられるようになってきた。

- ① ハザードマップの作成と公表の整備率の低さ
- ② 住民と行政双方の間での情報の提供不足による危機管理の甘さ
- ③ 水や食料品が不足したまま孤立状態が続いた避難所（避難所の1階水没）
- ④ 逃げ遅れたお年寄りたちの避難と生活再建の目途が立たない高齢者や障害者の避難所生活の長期化
- ⑤ 水防団の活性化と活動環境の整備の促進
- ⑥ ボランティア活動の充実に向けたコーディネータを積極的に育成
- ⑦ 放置された被災車が緊急車両の通行を阻む
- ⑧ 集中豪雨で鉄道網が大混乱し、帰宅困難者が駅に溢れる
- ⑨ 地下街やビル管理者の水防対策
- ⑩ 家屋被害の深刻さ
- ⑪ 町に溢れた災害ゴミの収集に1ヶ月、処理に半年を費やす
- ⑫ 想定を超える大雨で対応に遅れ

(3)福岡市での豪雨による社会インフラへの影響

2003年（平成15年）7月には、梅雨前線が九州北部に停滞し、南からの暖かく湿った空気が流れ込み、前線の活動が活発になったため、福岡市を流れる御笠川で氾濫し、博多駅やその周辺の冠水でJR・地下鉄・地下街といった社会インフラの被害が発生した。この災害の背景として、御笠川の治水計画にもとづく河川事業や下水道事業が推進されていたが、このときにはまだ完成していなかったため、当時は河積の小さく、発生した洪水を流すことはできなかった。すなわち、降雨の規模が大きかったこともあるが、計画規模を超える豪雨があれば、特に中小河川では溢れる可能性があり、河川防災は流域全体で総合的に考えなくてはならないことを示唆する災害であった⁷⁾。

(4)2004年（平成16年）における風水害の特徴⁸⁾

1年後の2004年（平成16年）には、災害の年であったと言っても過言ではない年である。過去最高の10個の台風が日本に上陸したばかりでなく、梅雨前線の活動により新潟・福島、福井に集中豪雨をもたらし、甚大な被害が発生した。被害の全容としては、表1.1.1に示すとおりである。死者・行方不明者 245名、被災家屋 275,678棟と例年になく非常に多く、台風16,18,23号ではそれぞれ5万棟以上の家屋に影響があったことが報告されている⁸⁾。

表 1.1.1 2004年（平成16年）の風水害による被害状況

事象	月	死者・行方不明者 (名)	負傷者 (名)	全壊棟数	半壊棟数	一部損壊 棟数	床上浸水	床下浸水	被害家屋 小計
台風4・6号	6月	5	117	1	5	168	4	45	223
新潟・福島 豪雨	7月	16	4	70	5,354	94	2,149	6,208	13,875
福井豪雨	7月	5	19	66	135	229	4,052	9,675	14,157
台風10・11 号	7・8 月	3	19	11	22	61	274	2,579	2,947
台風15号	8月	19	28	16	88	663	400	2,326	3,493
台風16号	8月	17	288	35	133	8,909	14,565	32,266	55,908
台風18号	9月	45	1365	132	1,396	65,065	1,570	6,626	74,789
台風21号	9月	27	98	92	783	2,007	5,193	14,412	22,487
台風22号	10月	9	166	135	287	4,509	1,561	5,485	11,977
台風23号	10月	98	552	893	7,762	10,834	14,289	41,120	74,898
静岡の豪雨	11月	1	—	—	—	4	114	815	933
合計		245	2656	1451	15,965	92,543	44,171	121,557	275,678

※ 上記表は、参考文献7)に示されている集計を再編集したものである。

※ 全壊および半壊の定義は、以下の通りである。

全壊：損壊または流失住家の床面積が延べ床面積の70%以上、または住家の主要部分の損害割合が50%以上
半壊：損壊または流失住家の床面積が延べ床面積の20～70%以上、または住家の主要部分の損害割合が20～50%以上

これらの度重なる台風・集中豪雨による豪雨災害の背景とそこから見える課題として、以下のように挙げられている⁸⁾。

- ①大河川の治水対策を優先し推進してきたため、大河川の氾濫発生はきわめて少ないが、中小河川の整備の遅れが台風や集中豪雨による水害が頻発した。
- ②地下空間の浸水も発生し、外水氾濫のみならず内水氾濫も被害を拡大させた原因の一つである。
- ③過去には水害が頻発していた地域に住居や工場が進出してきた。これは河川改修によって、徐々にではあるが、洪水による浸水の頻度が少なくなってきたためであるが、この年に見られるように台風や集中豪雨といった河道改修規模を超える外力が襲来すれば被害が発生する。
- ④急激な高齢化社会の到来によって災害時の要援護者が増加している。7月の新潟豪雨では死者の80%が70歳以上の高齢者である。さらに、平成16年発生の風水害による死者と行方不明者の60%が65歳以上であった。
- ⑤約640市町村160万人以上に避難勧告・指示が発令された。

上記のような2004年（平成16年）の災害を引き起こした気象的な要因⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾があるにせよ、今後特定の流域や地域だけが被害を受けるということではなく、広域に亘り全国各地において被害が発生する可能性があることを特徴づけた。

2004年の梅雨期の集中豪雨や度重なる台風の上陸により、全国各地で激甚な水害・土砂災害および高潮災害が多く発生したことを受け、国土交通省は、気象状況、社会的状況の変化による災害対策の課題を、『総合的な豪雨災害対策についての緊急提言』¹²⁾としてまとめた。この提言を受け、『豪雨災害対策緊急アクションプラン』¹³⁾を策定した。

(5)2005年（平成17年）の災害の特徴¹⁴⁾

2005年（平成17年）の災害として、梅雨前線と秋雨前線による2つのタイプの集中豪雨の発生によるものが特徴的であった。

6月27～29日に新潟県と富山県、7月1日～6日に中国地方、7月8日～10日に中部地方、九州地方で発生し、死者12名を含む人的被害と浸水被害が発生した。さらに、9月4日～5日にかけて、秋雨前線と台風の影響による集中豪雨が東京で発生した。杉並区では、1時間112mm、総雨量263mmという非常に激しい降雨量を観測した。この豪雨による荒川支川のうち8河川が氾濫した。神奈川県・埼玉県でも同様の豪雨により、被害が発生している。幸い人的被害はなかったが、東京都では床上・床下浸水家屋が6,754棟であり、埼玉県1,581棟、神奈川県90棟の被害であった。

上記の秋雨前線による豪雨は、台風14号が日本列島に停滞していた秋雨前線を刺激したものであったが、台風14号も九州地方を中心に猛威をふるった。宮崎県美郷町神門で3日間の総雨量1321mm、えびの市で1307mmといった記録的な豪雨により、住家の浸水、土砂災害が相次いだ。この台風14号による全国的な被害は、死者・行方不明者29名、負

傷者 179 名, 住家の全壊 1,178 棟, 半壊 3,692 棟, 一部損壊 2,817 棟, 床上浸水 7,159 棟, 床下浸水 13,580 棟であった。

また, アメリカではハリケーン・カトリナがルイジアナ州ニューオリンズ市周辺に甚大な被害をもたらした。高潮による堤防が決壊して, 市の 8 割が水没し, 死者が 1000 人を超えるといった甚大な被害をもたらした。また, 日本よりも進んでいる水害保険対象の被害額は 344 億ドルに達した。この災害で注目されたのが, アメリカにおける危機管理対応であろう。ハリケーン上陸 2 日前から大規模な避難が始まり, 国道を避難用に一方通行に切り換える等といった対策を執られた。なお, 避難手段を持たない 10 万人前後の人々が市内にとどまっていたことといわれている。

(6)2006 年（平成 18 年）の災害の特徴¹⁵⁾

2006 年（平成 18 年）以降の災害の特徴としては, これまでに見てきた災害を引き起こしてきたような台風や前線性の豪雨によるものにはかわりはない。この年の 6 月の梅雨前線性の豪雨では, 沖縄県・九州地方, 台風 10 号・前線豪雨では全国各地で川遊びをしていた人々が増水した水難事故が発生した。10 月の低気圧による被害は, 関東地方から北海道にかけて死者 29 人（海上 17 人・山岳 11 人含む）、行方不明者 19 人にのぼった。

この年から記録的な豪雨という観測結果とその報道がよく聞かれるようになった。例えば, 7 月の月間雨量は全国 171 地点で観測史上最多記録が更新された。また, 土砂災害の発生件数も 1,324 件で過去 5 年間の中で 2 番目となり, 死者・行方不明者 23 人, 負傷者 31 人に被害が出た。

特に 7 月の梅雨前線の長期停滞により九州地方から東日本に停滞し, 活発化したため, 鹿児島県, 宮崎県, 熊本県, 島根県, 鳥取県, 兵庫県, 京都府, 福井県, 石川県, 長野県で 7 月平均雨量の 2 倍を超える雨量を観測した。この豪雨によって, 上記府県が甚大な被害を受け, 死者・行方不明者 30 人に上った。さらに, この豪雨で全国の市町村で避難勧告・指示が多く発令された。その内訳は, 避難勧告は 18 府県 93 市町村で, 約 8 万 7000 世帯, 対象人口約 22 万人であり, さらに避難指示は 7 府県 19 市町村で約 1 万 3000 世帯, 対象人口約 3 万人と発表されている。このように, 東海豪雨から教訓として, 市町村が避難の必要性を適宜判断し, 避難勧告等を発令するケースが年々増加してきている。表 1.1.2 は, 平成 12 年から平成 18 年までの発令回数の変化である。一概に回数の比較はできないが, 2004 年（平成 16 年）を除けば約 2 倍に増加していることがわかる。

表 1.1.2 避難勧告・指示等の延べ数¹⁵⁾

年度	発動回数	主だった災害
平成 12 年度	133	東海豪雨 等
平成 13 年度	122	高知県西南部豪雨災害 等
平成 14 年度	113	台風 6・7 号連続の上陸 等
平成 15 年度	124	福岡周辺の短期集中豪雨／台風 10 号 等
平成 16 年度	730	新潟・福島豪雨／福井豪雨／台風 10・11 号／16 ／18／21／23 号 等
平成 17 年度	221	台風 14 号 等
平成 18 年度	202	平成 18 年 7 月豪雨 等

※消防庁調べ

(7)2007 年（平成 19 年）の災害の特徴¹⁶⁾

2007 年（平成 19 年）7 月 5 日～17 日に台風 4 号および梅雨前線豪雨が沖縄県・九州地方で発生し、熊本県を流れる白川、緑川では観測史上最高水位となり、氾濫危険水位を超える水位に達し浸水被害が多発した。8 月 2 日～4 日には九州地方で台風 5 号が上陸し、宮崎県延岡市周辺で 1 時間 120mm という猛烈な降雨量が観測されるとともに、周辺地域で 80mm を超える時間雨量が観測された。さらに、9 月 5 日～8 日に影響を与えた台風 9 号は、東京都を流れる多摩川で計画高水位を超える水位を記録するなど河川が氾濫寸前になった。この台風では、避難勧告指示を発令したものの、避難を実施したのはわずかな世帯であったことから、住民の意識を高めるとともに、どのタイミングでどのように避難情報を提供していくのが課題と残った。

一方で、9 月 15 日～18 日には東北地方を秋雨前線性の豪雨が発生し、秋田県でほぼ全域で最大日雨量を更新するという記録的な豪雨となった。

(8)2008 年（平成 20 年）の災害の特徴¹⁷⁾

7 月～9 月にかけて、梅雨前線や低気圧による豪雨災害が全国で発生した。この年は、台風による被害がないという年であったにも関わらず、前線性、低気圧による豪雨は、中小河川の氾濫原での甚大な被害を引き起こし、県管理河川の氾濫が問題にされた。

特に、8 月末の豪雨は、東北・関東・中部・中国地方と広範囲に人的被害、浸水被害といった影響をあたえた。例えば、東京都八王子市では、1 時間 63mm という猛烈雨が観測され、記録を更新するとともに、市管理普通河川 6 河川が氾濫し、床上・床下浸水 123 棟の被害となった。

また、愛知県西三河部・東三河北部・尾張部で集中豪雨が発生し、一宮市では 1 時間 120mm を記録し、さらに岡崎市では 146.5mm という全国第 8 位という猛烈な降雨を記録した。また、総雨量としては 400mm 前後を記録しており、県内の 27 河川 46 カ所で堤防決壊、護岸崩壊などの河川災害が発生した。さらに、この氾濫により、死者 3 名、床上浸

水 2,273 棟、床下浸水 11,207 棟の被害が発生した。

この豪雨で愛知県内では、猛烈な豪雨と河川の増水が続く中で、名古屋市は約 36 万 6000 世帯、岡崎市は市内全域で約 14 万 6000 世帯、対象人口約 37 万 6000 人に対して避難勧告を発令した。このときの避難率は、非常に低いまりでなく、深夜に発令していたため、ほとんどの人が避難しなかったことが報告されている。この理由として、深夜で足下が暗くかつ浸水が始まっていたため避難ができなかったこと、さらには深夜であったため、住民は行政から発令された避難勧告を知らなかったという状況であり、避難情報の提供とタイミングの問題が顕在化した災害でもあった。

この年は、局地的な豪雨が多発した年でもあった。この豪雨は、10 分オーダでの豪雨により河川の水位が急激に上昇するという現象であり、特に神戸市都賀川では、10 分間に 1.34m の水位が上昇し、児童 3 名を含む 5 名が流され死亡した。この原因として、急な雨で橋の下に雨宿りをしていたところを段波状の洪水流によって流されたことが明らかになっている¹⁸⁾¹⁹⁾。さらに、栃木県鹿沼市のアンダーパスで軽自動車の水没し、運転していた女性が死亡した。このような事例が多発し、『犠牲者ゼロ』を目指した水難事故防止対策の取り組みがスタート切った年でもある。

(9)2009 年（平成 21 年）の災害の特徴²⁰⁾

7 月には、中国地方や九州地方で梅雨前線が活発化し、記録的な大雨となり、山口県・福岡県・長崎県では、1 時間 80mm を超える猛烈な雨が観測された。この豪雨では、全国で死者行方不明者 35 名、負傷者 59 名、床上浸水 2,137 棟、床下浸水 9,727 棟の被害が発生した。特に、山口県では 22 名の死者を出ており、防府市の特別養護老人ホームの入居者 7 名が亡くなっている。さらに、国道等が被災したため、道路通行止めが相次ぎ、山間部の孤立集落も発生した。

一方で、福岡県では、1 時間雨量 100mm を超え、平成 15 年に氾濫した御笠川等の河川が増水し、1 万世帯あまりに避難勧告が発令された。なお、この洪水によって福岡県では死者 10 名、床上浸水 1,318 棟、床下浸水 4,126 棟の被害が発生した。

また、8 月に襲来した台風 9 号によって兵庫県、岡山県、高知県、徳島県といった範囲で豪雨がもたらされた。特に、兵庫県佐用市の被害は、死者・行方不明者 20 名をはじめ、住家、道路、農地、JR 等に大きな影響を与えた。この災害では、猛烈な豪雨のために自主的に避難している途中で流され、水害時の避難のタイミングや避難のあり方の問題が提起された²¹⁾。

(10)2010 年（平成 22 年）災害の特徴²²⁾

6 月中旬から 7 月中旬にかけて梅雨前線による豪雨によって、東日本から西日本にかけて記録的な降雨と土砂災害・浸水被害が発生した。これは、梅雨前線が九州から本州にかけて停滞して、断続的に活動が活発になり、局地的に 1 時間 80mm を超える猛烈な雨が観測された。さらに、九州南部ではこの期間に 1500mm～2000mm に達し、平年の 2 倍を超える雨量となった。この期間では、鹿児島県、山口県、広島県、岐阜県などで甚大な被害

が発生した。死者・行方不明者 21 名、床上浸水 1,786 棟、床下浸水 5,702 棟という甚大な被害をもたらした。

10 月 18 日～21 日に奄美地方において、1 時間 133mm、総降雨量 899mm という猛烈な降雨が発生した。これは、台風 13 号の影響で南からの湿った空気が流れ込んだために発生した。島内では道路や通信網が寸断され、発災直後においては、自治体等による被害状況が把握できないという事態に陥った。この災害で死者 3 名、床上浸水 119 棟、床下浸水 767 棟という甚大な被害となり、要援護者施設の入所者 2 名が死亡したほか、倒壊した家屋の下敷きとなり 1 名死亡した。

(11)2011 年（平成 23 年）災害の特徴²³⁾

7 月新潟・福島豪雨は、7 月 26 日から 7 月 30 日にかけて発生した集中豪雨である。新潟県では河川の堤防が決壊するなど大きな洪水被害をもたらした。前線が新潟県付近に停滞し、高気圧同士の間で日本列島が挟まれ、同県下越地方西部や中越地方北部に日本海から発達した雨雲が次々と流れ込み、1 時間に 100 ミリ前後の猛烈な雨がほぼ同じ場所で降り続いた。新潟県では五十嵐川などの信濃川水系の 6 つの河川で堤防が決壊が相次ぎ、三条市など、広範囲で浸水被害が発生した。この時の降雨は、超過確率 150～300 年となっており、治水安全度目標を上回るものであった²³⁾。降雨の規模が大きかったが、平成 16 年の時の教訓を生かされ、新潟市や三条市では避難判断水位付近で避難勧告を発令している。特に、三条市では安全な場所へ避難するように誘導された住民が約 1500 人であった。被害のあった周辺では、まるごとまちごとハザードマップ、逃げ時マップ²³⁾といった浸水の状況に応じた避難方法について周知していたため、無理な避難はなく、事前に住民が避難行動・方法について認識し、個々の住民が行動を実行したためと考えられている。

9 月 3 日～5 日にかけて台風 12 号は、高知東部から四国地方、中国地方を縦断し、西日本から北日本にかけて記録的な降雨が観測された。特に、紀伊半島では、8 月 30 日 17 時からの総降雨量が、多いところで 1,800mm を超えた。この災害により、紀伊半島を中心に甚大な被害が発生した。死者 78 名、行方不明者 16 名、住家の全壊 371 棟、半壊 2,907 棟、床上浸水 5,657 棟、床下浸水 19,152 棟という被害であった²³⁾。また、降雨量が非常に多かった熊野川水系では深層崩壊による天然ダムが多く形成され、国道も通行止めとなり山間部の社会インフラが寸断された。

この 2 週間あとに台風 15 号が静岡県に上陸し、強い勢力を保ったまま関東地方から東北地方に進んだ。この台風では、西日本から北日本にかけて広い範囲で記録的な降雨が観測された。九州では 1000mm を超えるところもあった。

2 つの台風で多くの地点で総降雨量が 9 月の降雨量平年値の 2 倍を超えた。この災害の特徴として、愛知県を流れる一級河川庄内川で越水し、名古屋市守山区で浸水被害が発生したほか、肱川、阿武隈川、番匠川、那珂川、熊野川支川相野谷川など四国から東北までの河川で浸水被害が発生した²³⁾。このときに、名古屋市では避難判断基準に従い、名古屋市全域で 100 万人への避難勧告を発令した。このときに、避難所の収容人数が 30 万人にも満たない状況の中で、避難勧告を発令したことで、市の取り決めと避難民の受け入れ態

勢の問題が顕在化した。

1.1.2 防災対策の現状と課題

(1)国土交通省による豪雨対応に関する答申の遷移

長崎大水害から平成 23 年までの災害について整理したが、ここ最近の災害を引き起こす降雨状況が従来見られなかった非常に強い様相が、異なっていることがわかる。これは、地球温暖化の影響であるとも言われている。しかし、確実に河川の整備規模を超えるような降雨が発生し、甚大な被害が毎年のように起こっていることや、平成 23 年台風 15 号のように発生位置が日本近海であったように、今までに考えられないことが起こっていることは確かである。このような繰り返される被害の発生を省みて、政府が様々な対策の方向性を示し、それに従い、国土交通省、都道府県、市町村は対策を執ってきた。

1) 都市型水害に対する対応策

前述した東海豪雨を契機に平成 12 年 9 月に国土交通省河川局および都市局は、『都市型水害緊急検討委員会』を設置し、提言としてとりまとめた。同年 12 月に発表された河川審議会中間答申『流域での対応を含む効果的な治水のあり方について』²⁴⁾では、都市化の進展に伴う流出量の増大、頻発する集中豪雨による危険性の拡大によって従来の河川改修による対応では洪水防御の効果に限界があること、河川の流下能力を超過する洪水への対応が等の課題が挙げられており、効果的な洪水対策の推進のためには、従来の河川改修と併せて、地域特性に応じた堤内地での対策を実施する必要があることを述べている。具体的な治水対策としてダムや築堤などの通常の河川改修を計画規模に向けて実施していくこととともに、減災対策として、輪中堤・宅地嵩上げおよび土地利用方策、建築物の耐水化、貯留施設等による流出抑制対策等の構造的な対応、河川と下水道の連携強化、ハザードマップの作成・公表、避難洪水予報の充実、避難誘導といった非構造的な対応を実施することとしている。この答申では、新たな治水対策への転換を図っていく必要性について提言している。

2) 平成 13 年 6 月の水防法の改正

平成 13 年 6 月に水防法²⁵⁾の改正が行われた。この水防法は、昭和 22 年 9 月のカスリーン台風などの大災害の教訓により水防活動の重要性が認識され、昭和 24 年に制定されたものである。伊勢湾台風での甚大な被害の発生により昭和 34 年に改正されたが、このときまで改正はされてこなかった。

この改正の背景には、東海豪雨で 58 万人もの住民に避難勧告が出されたが、住民の間では的確な情報が伝わらず、迅速な避難行動がとれなかったなど、防災情報の伝達や避難誘導のあり方について課題が残されたことから、水防法の改正により以下の内容が追加された。

✓ 国土交通大臣に加え、新たに都道府県知事が洪水予報を行うこと。

- ✓ 洪水予報河川が氾濫した場合に浸水が想定される区域をし、公表すること。
- ✓ 市町村の地域防災計画において浸水想定区域での洪水時の円滑かつ迅速な避難の確保を図るために必要な事項を定め、それらの事項を住民に周知させること。

この改正により、既に洪水予報河川・水位情報周知河川に指定されている河川では、河川管理者が浸水想定区域図を作成し、市町村に通知してきた。さらに、市町村では、視覚的に洪水のリスクを周知するため洪水ハザードマップ²⁶⁾を公表してきた。その際に、国土交通省や都道府県といった河川管理者は、ハザードマップを作成に当たり支援を行うこととしており、その作成過程に河川管理者も携わってきた。

3) 台風性・局地性の豪雨による中小河川の防災・減災対策

2004年（平成16年）には10個台風、局地的な集中豪雨の発生により、日本国内で甚大な被害多発したことをうけ、国土交通省は2004年12月10日に『豪雨災害対策緊急アクションプラン』²⁷⁾を策定した。このアクションプランでは、図1.1.2に示す緊急的に取り組むべき事項と具体的な整備目標について提示している。この提示内容の前提として、平常時からの防災情報の共有、堤防・ダムなどの防災施設の機能維持および向上、地域の防災対応力の再構築等の具体的な目標整備内容が提示された。このアクションプランと並行し2005年4月に国土交通省社会資本整備審議委員会河川分科会豪雨災害対策総合政策委員会が『総合的な豪雨災害対策の推進について』²⁸⁾という、報告書を公表している。この内容の要約は以下の通りである。

- ✓ 局地的な予測データを活用した中小河川における洪水予測の充実
- ✓ 市町村長が的確に避難勧告・指示の発令をするための目安となる河川水位情報等の整備による充実
- ✓ 洪水予測に基づく将来の見通しを河川管理者（国・都道府県）から市町村長に直接助言できる仕組みの構築
- ✓ 住民が自らの確に状況を判断し、避難を行えるような切迫度がなどが実感できる情報の提供
- ✓ 情報の迅速かつ確実な収集・伝達体制の整備
- ✓ 浸水想定区域の対象区域の拡大や洪水ハザードマップの全国的な緊急整備、豪雨災害に適合した避難所の総点検、わかりやすい防災用語への改善、まるごとまちごとハザードマップの整備など、平常時からの防災情報共有の徹底
- ✓ 災害時要援護者の避難誘導體制の充実
- ✓ 地下空間における避難誘導體制の構築



図 1.1.2 豪雨災害対策緊急アクションプランの抜粋²⁷⁾

4)平成 17 年 6 月の水防法改正

2005 年（平成 17 年）6 月には、水防法²⁹⁾が再度改正された。改正内容は、以下の通りである。この段階で豪雨による行政内部がとるべき内容が大方抽出されたと考えられる。

- ✓ 局所的な集中豪雨が多発し、流域が比較的小さい中小河川での洪水予報、水防警報の等の水害時の情報提供の充実
- ✓ 被災経験が減少して危機管理意識が低下している中で、災害時に避難行動が的確に行われるために、危険の程度が実感できる浸水想定区域図および洪水ハザードマップの

作成の促進

- ✓ 風水害による死者や行方不明者の多くは、高齢者であること、園児が浸水した保育園に取り残される事態が生じたことを踏まえ、災害時要援護者に対する警戒避難体制の充実
- ✓ 自治会などの地域コミュニティの衰退、水防団員の減少や高齢化など、地域の共助体制の弱体化が懸念されており、現状の社会に即した水害防止体制の強化

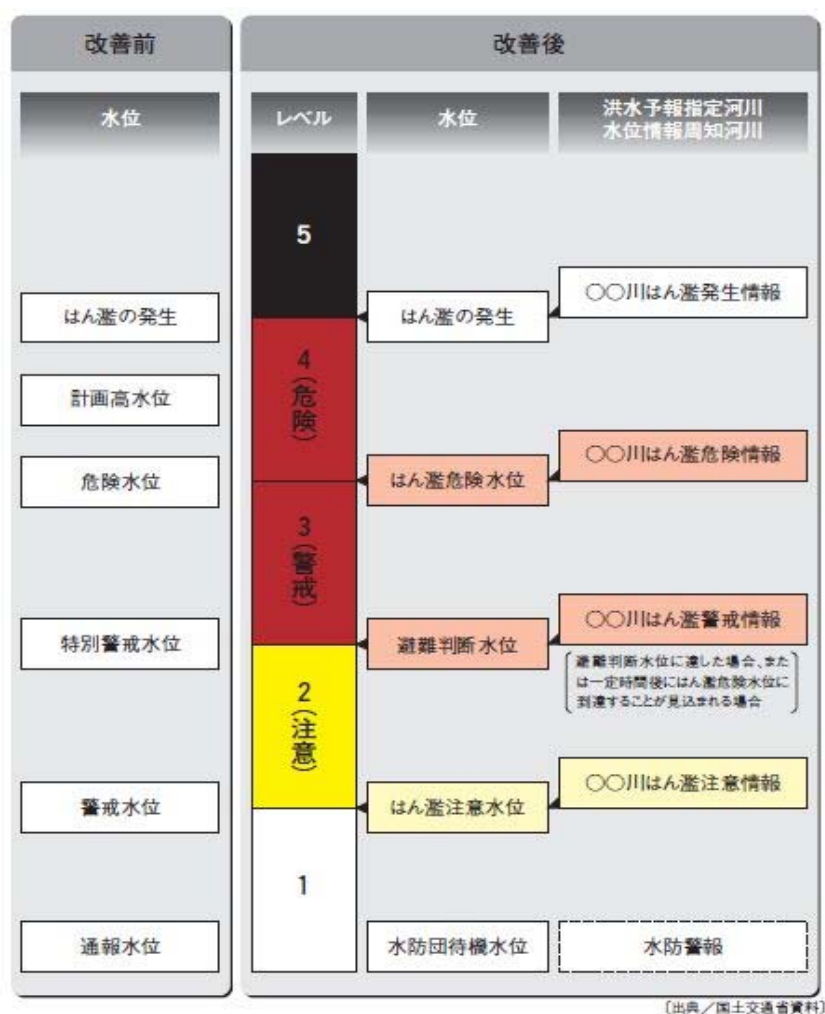
5) 減災対策の具体的な方向性

2005 年 12 月には、『洪水氾濫時・土砂災害発生時における被害最小化策のあり方』³⁰⁾では、人的被害の軽減、被災した場合の経済社会早期回復、BCP の整備といったことを重要と考えに立ち、これまでの治水施設等の整備のみならず、被害を受ける洪水氾濫域等での対策の必要性について提言している。具体的な内容は以下の通りである。

- ✓ 民間ビルとの協定やサービスエリア等の活用といった氾濫時にも機能する避難場所の確保
- ✓ 氾濫時にも機能する避難路・救援路の確保
- ✓ 孤立集落への情報連絡網の整備、医療関係施設、備蓄施設の確保
- ✓ 水害に対する知識の普及、洪水時に注意を要する箇所の危険情報の提供、ハザードマップの整備、浸水センサーや浸水モニター制度の導入と洪水氾濫情報の収集、区域を限定した避難勧告等の改善
- ✓ 災害発生後の危機管理行動計画の策定および訓練の実施

6) 防災情報のあり方

2006 年（平成 18 年）6 月に『洪水時等に関する防災情報体系のあり方』という提言³¹⁾が発表された。この提言では、度重なる災害において河川管理者から提供されている水位情報等が市町村の職員や住民の避難勧告等の発令判断や避難行動に結びつきづらいという現場からの指摘から、洪水等に関する防災情報体系を見直し、防災情報を反映した水位の統一性、水位の名称や危険レベルの明確化、これによる発表情報と避難行動の関連性の明確することを提言している。この提言に基づき、全国の洪水予報河川および水位情報周知河川における水位観測所における基準水位の名称が変更された。図 1.1.3 は、基準水位に対する改善前後の比較を示したものである。

図 1.1.3 水位の名称の改善³¹⁾

以上のように災害が起こるたびに、課題について国土交通省他が中心となって洪水防御対策や被害軽減対策についての方向性を示してきており、水防法の改正によって、国管理河川のみならず都道府県管理河川で流域が一体となって対策メニューを実施してきた。

7) 地球温暖化による気候変動の影響を受けた洪水・土砂災害の適用策

IPCC第4次報告書³²⁾が公表され、地球温暖化予測モデル群の19のモデルにおいて降水量が変動予測について分析した結果、降水量の振幅幅が増大し大雨が発生することが予想された。また、一過性の積乱雲の発生・発達・移動による大雨が発生し、総雨量が1000mmを超える大規模な降雨甚大な被害がもたらされたことを背景とし、国土交通省社会資本整備審議会河川分科会は『水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について』（中間とりまとめ³³⁾（平成20年6月）において、気候変化により激化する水害、土砂災害および高潮災害等に対して犠牲者ゼロへ向けた適応策の検討を進める必要性が提言した。これを受け、2009年（平成21年）6月に、『水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について』という答申³⁴⁾を公表した。この中で、現状の

治水施設の整備が約6割程度で低い水準であること、降雨量の増大により壊滅的な被害が発生する可能性があることなどから気候変動への適応策について立案することが述べられている。また、気候変動によるリスクの増大を受容するための適応策と温暖化防止のための緩和策については共に進めていくことが必要であることも述べられている。答申にある適応策の基本的な方向性として、河川内で氾濫原の安全を確保するという従来型の治水方策に加えて、氾濫を流域に分担させる方策を含んだ治水対策への転換を図るべきと答申している。

8) 中小河川における豪雨対策

国家的な地球温暖化による適応策の方向性が検討されている傍らで、平成 20 年以降の集中豪雨によって中小河川での急激な水位上昇や氾濫によって人的被害が発生したことを受け、中小河川における整備や情報提供のあり方について検討が始まった。2009 年（平成 21 年）1 月に中小河川での局地的な豪雨対策ワーキングの検討報告書³⁵⁾がとりまとめられた。この報告書の中では、中小河川における洪水対応として、簡易的な河川水位や被害の想定方法を整備することや行政における初動体制の迅速化、防災教育の充実を図り、より地域と一体となった地域防災力の維持・向上につとめ、頻発する中小洪水の水害による『犠牲者ゼロ』を確実にしていく必要があるため、以下の示す対策の方向性を提言している。

✓ 初動体制の迅速化

降り始めから氾濫までの限られた時間の中で被害を最小限にするために、防災関係機関が速やかに初動体制に入るための体制

✓ 河川管理者の対応力の向上

局地的な豪雨でも河川管理施設の操作を行うため、河川管理者の対応力を維持・向上させるための対策

✓ 地域防災力の維持・向上

行政のみならず地域の自主防災会、水防団、企業、住民が各々の役割を十分に認識しつつ互いに連携しながら、地域の自然・社会特性に適した地域防災力を維持・向上させるための対策

✓ 防災情報の共有、防災意識の向上

洪水時に住民が避難行動をとれるよう、平常時から防災情報を共有するとともに、防災意識を向上させるための対策

✓ 降雨・河川水位の監視強化、予測の高度化

降り始めから氾濫に至るまでの時間の中で、被害を最小限にするために河川の水位予測とそれに基づく氾濫被害の発生形態を予測するための対策

✓ 適切な河川維持管理の推進

降り始めから氾濫に至るまでの時間の中で、被害を最小限にするために河川の水位予測とそれに基づく氾濫被害の発生形態を予測するための対策

9)洪水リスク管理の必要性

上記で説明した治水対策・減災対策の答申を受け、関係機関へ解決に向けた検討を求めてきたが、検討の方向性やあるべき姿は明確化されてきた。しかしながら、水害による被害者は、毎年 100 名前後を横ばいに推移していることから、より具体的な対応、すなわち行政と住民の意識の問題、避難の問題、防災体制の問題など技術的な側面からのアプローチでは、問題の解決ができないことが、平成 20 年の災害あたりから顕在化してきた。長崎大水害によって、都市の脆弱性が問題となったが、現在のように毎年のように台風・前線性の局地的な豪雨が発生することは多分予想されていなかったであろう。ここ 10 年の日本で起きている異常気象ともいえる現象の数々とそれによる甚大な被害が多く発生し、従来の治水対策に加えて減災という概念で施設ではなく、『人』への対応が求められてきているのが現在の状況である。

一方で、日本だけではなく海外に目を向けると、地球温暖化や先進国も同様に日本と同じような立場であり、ハード施設整備を中心としてきた治水対策から、氾濫原管理の多角的な手法を組み合わせた **Flood Risk Management** の観点からの政策展開が推進されている。

オランダでは、従来の治水安全度を超過確率 2,500~10,000 年という高い整備³⁶⁾を進めてきたが、1993、1995 年のライン川の氾濫、アメリカのハリケーン・カトリーナの惨状を目のあたりにし、治水安全度の考え方の変更に向けて舵をきった³⁷⁾。具体的には、氾濫による死者数、経済被害額等の複数の指標およびその発生確率を算出した上で、望ましい安全度を設定するものである。また、それに併せて、**Flood Risk Map** の整備とどのように避難につなげていくのかという問題も現在浮上している。当国でも日本と同様に、ハード施設（堤防、河口堰）を中心に整備されてきたが、歴史的にハード施設整備を当然と思っている国民への説明と避難するという概念を如何に浸透させるのかが問題となっている。そのため、洪水の発生確率という指標から洪水がもたらす結果の指標に基づく治水計画への転換とその説明が行われている。また、洪水との共存という発想から **Floating House** という施策を推進し、実際に住宅販売まで行っている。

イギリスでは、洪水防御から洪水リスク管理へ（**From Flood Defence to Flood Risk Management**）の掛け声の下で政策展開が図られている。政府によるリスク評価として、住民や地方自治体等への洪水の危険性周知を目的とした洪水地図（**Flood map**）の整備・公表、政策決定や洪水保険料の設定に用いられるリスク評価（**National Flood Risk Assessment**）が実施・公表されている³⁷⁾。

さらに、EU では、このような政策の展開を準備するために、世界中の様々な観点から作成されたハザードマップに関する事例を収集し、国や流域・地域に応じたマップ作成のための事例集を作成し、公表している³⁸⁾。

また、アメリカについて、**Tolerable Risk Guideline** が作成され、人的リスクを例として施設が発生確率を低下させるものと被害規模を低下させるものに大きく分類できること、そのポートフォリオに関する基本的な考え方³⁷⁾を示している。

日本での治水・減災に関する取り組みのみならず世界的に見ても同様な展開が実施され

ていることが理解できる。減災対策を考える際に、日本の施策のみならず地球温暖化による気候変動を背景に様々施策を柔軟に理解していくことが重要と考えられる。

以上のように、洪水防御から洪水リスク管理への政策の展開というのは、今後も重要な治水対策として重要視されることは否定できない。そこで、岡崎市や名古屋市の避難勧告等の発令といった問題や毎年 100 名程度の人的被害が発生している現状において、本論文では、行政・自主防災会・住民が如何に身を守るために避難するのかという課題に着目し、地方自治体の実情、既往の研究等についてレビューを行う。

(2)犠牲者ゼロを実現するための施策

ここ 10 年程度の豪雨によって、従来の治水対策の枠組みでは洪水や土石流などノが威力を施設で被害を防止することが、限界であることがわかった。この傾向は、日本のみならず先進国も似たような状況にある³⁸⁾。

日本における河川政策は、高度経済成長時代に社会的なニーズに対して計画された事業である。昭和 34 年に伊勢湾台風が中部地方を襲い、5 千人余りの死者を出す大水害が発生したのを契機として、治水事業への投資のための治山治水緊急措置法が成立し、また治水特別会計法が定められた。これにより、河川行政を後押しする予算取りがスムーズになった。さらに、昭和 36 年災害対策基本法が制定されて総合的な防災体制が図られた。

この災害対策基本法³⁹⁾は、当時の災害による犠牲者の多さから行政主導の防災体制を確立することが急務であったといえよう。この法律第三条には以下のことが明記されている。

『国は、国土並びに国民の生命、身体および財産を災害から保護する使命を有することにかんがみ、組織および機能の全てをあげて防災に関し万全の措置を高ずる義務を有する。』

また、第四条には都道府県の防災に対する責務、第五条には市町村の責務があることが明記されている。これは、行政が防災業務に対する責務が法で規定されていること他ならない。その一方で、堤防やダム建設による洪水防御対策を営々と進めてきた結果、現在では、年間数千人であったことから現在では年間百人にまで減少していることは河川行政の成果であろう。しかし、近年の災害の要因に見られるように、治水計画で設定した確率的な外力想定を上回るあるいは現状の河道の整備規模を上回る豪雨による洪水の発生があり、堤内地の資産への被害、人的な被害が後を絶たなくなっている。すなわち、想定範囲を設定したものを超える自然の猛威がいつでも起こるような時代になっていることは言うまでもなく、行政が主体として取り組んできた防災には限界が顕在化している現状にある。今後、年間百人程度犠牲者をゼロにするための知恵を醸造し、維持を図っていくことが必要であると考えられる。

当たり前のようであるが、上記に示した行政の責務だけでは住民の命はまもれないことは明確な事実であることは既往の災害が実証している。しかし、東海豪雨以来、防災教育や避難の必要性を住民に問い、地域単位でも防災意識の徐々にではあるが高くなってきた

ことは言うまでもない。多くの住民は依然と防災は行政がやるものという意識をもっていることも事実であろう。

このような自然の猛威から身を守らなければいけない対象者の意識を換えることは、時間がかかることも確かである。例えば、平成23年3月11日の東日本大震災で津波が襲う前に、釜石市の中学生は走って、高台に逃げたため、その日に在校していた中学生、小学生の犠牲者はゼロであった。これは、長年の津波から身を守ることを教育してきたことのたまものである。このような事例から、これからの防災に対する行政・自主防災組織・学校・住民などが自分の命・周りの命を守るという意識と行動が求められるようになるであろう。

ところで、災害対策基本法³⁹⁾第六十条において避難を以下のように規定している。

第六十条 災害が発生し、又は発生するおそれがある場合において、人の生命又は身体を災害から保護し、その他災害の拡大を防止するため特に必要があると認めるときは、市町村長は、必要と認める地域の居住者、滞在者その他の者に対し、避難のための立退きを勧告し、及び急を要すると認めるときは、これらの者に対し、避難のための立退きを指示することができる。

2 前項の規定により避難のための立退きを勧告し、又は指示する場合において、必要があると認めるときは、市町村長は、その立退き先を指示することができる。

3 市町村長は、第一項の規定により避難のための立退きを勧告し、若しくは指示し、又は立退き先を指示したときは、すみやかに、その旨を都道府県知事に報告しなければならない。

(以下省略)

これによれば、立ち退き避難を前提した条文となっており、法律に従う行政があってもおかしくないという解釈が存在する。例えば、平成23年9月の台風12号によって愛知県庄内川が氾濫した際に、名古屋市が約100万人への避難勧告を発令した事例、平成20年8月豪雨での岡崎市が避難勧告等を発令した事例のいずれも、豪雨の状況と災害対策基本法を総合的に判断して発令したものであると理解できる。なお、このときの避難者はわずか数%であったにすぎない。また、避難勧告を発令しても、実際には避難所の収容人数が足りないにもかかわらず発令し、かつ開設という作業が間に合っていないなど、発令後の問題も指摘されている。もし、このときに全員が避難行動を起こしていたら、どうなっていたのかと考えると、ネガティブな結末しか思いつかない。また、兵庫県佐用町でおきた避難途中で遭難した事例⁴⁰⁾では、避難勧告が発令される前に、自主的に避難していることを考えると、如何に行政側の判断が難しいことがわかる。

依然と行政側の判断の難しさがある状況の中で、最近の水害、土砂災害での死亡原因は、様々場合が推測される。牛山ら⁴¹⁾は、2004年から2009年までの災害時の犠牲者307名の死亡原因について調査報告している。これによれば、洪水時の犠牲者が遭難した場所は屋内よりも屋外であり、これらの犠牲者のほとんどが『能動的に危険に接近した』という

理由である。さらに、これらの能動的な行動として、防災活動、様子を見に、見回り、建設作業、屋外レジャーというもので分類され、犠牲者は災害に対して何らかの対応をしていたところを遭難している。この能動的な行動をとった犠牲者は全体の3割であり、そのうち1割程度が避難行動をとったにもかかわらず遭難したことによるものである。また、洪水中に避難せず自宅にいたため犠牲になったケースは少数であったことも報告している。このような避難行動に相反した側面には、地域における洪水のリスクを公表していないために自己判断による行動や行政も指導ができないという状況にあるものと考えられる。

行政側が住民に避難を促すための根拠や住民もどのタイミングで避難するのかという、避難行動をする明確な基準がないために、過去の経験などを頼りに行動を行っているのが現状であろう。平成17年3月には、『避難勧告等の判断・伝達マニュアル作成ガイドライン』⁴²⁾が公表されている。このガイドライン作成の背景として、平成16年の一連の災害において、適切なタイミングで適当な対象地域に避難勧告が発令できなかったこと、避難勧告等が住民に迅速で確実に伝達ができなかったことを反省材料として、具体的な検討手順やとりまとめられたものである。この中では、避難所への避難を前提にした避難勧告・指示の判断基準というものが示されている。

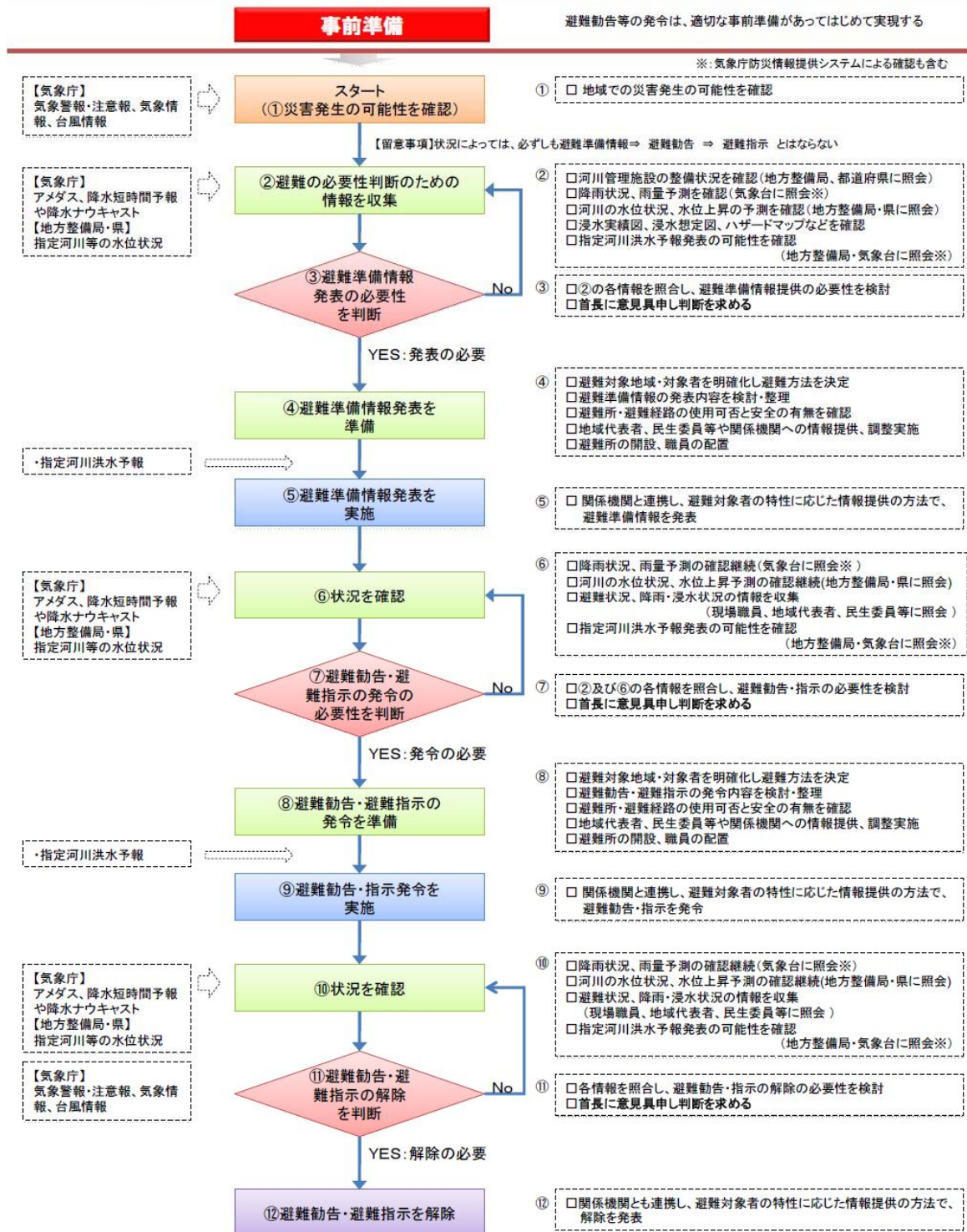
一方で、平成17年3月および平成18年3月に『災害時要援護者の避難支援ガイドライン』^{43) 44)}が広報されている。災害時要援護者の避難支援について、関係部局間の連携、避難勧告等の伝達体制、要援護者情報の共有、避難支援計画の具体化、避難所における支援および関係機関等との連携について示している。総務省⁴⁵⁾は、その後の進捗を監視すると共に、全国の事例集を収集して、取り組みの後押しをしている。その後、平成21年7月中国・九州北部豪雨災害および平成21年台風9号を受けて、平成21年8月に内閣府、総務省、文部科学省、厚生労働省、農林水産省、国土交通省、気象庁は、都道府県における防災に関するすべての部局に、『集中豪雨等における情報伝達及び高齢者等の避難支援について』、『避難勧告等の判断・伝達マニュアル作成ガイドライン』の周知徹底とその推進に向けて再度通知を行っている。その中で、都道府県の対策、市町村の対策に分けた通知をしており、政府としての支援、市町村への国、都道府県の支援について言及している。

さらに、平成22年3月には、より具体的な避難のあり方について言及した『大雨災害における避難のあり方等検討会 報告書 ～「いのちを守る」ための避難に向けて』⁴⁶⁾が公表された。これによれば、地球温暖化に対応した防災対策として、いのちを守るという観点から従来の枠組みを超えた発想による対応が必要であることが謳われている。この報告書では、特に避難の方法として、自助・共助・公助という役割を意識の問題として捉え、それぞれが単独ではなく、有機的なつながりの中で有効な避難の方法として、建物の二階以上に逃げるといった一時避難（垂直避難）についても選択の一つであることが報告されている。その一例として、愛知県清洲市の『逃げどきマップ』⁴⁷⁾や京都市の『防災マップ』⁴⁸⁾のように災害時の状況を踏まえて適切な判断と避難行動を実現するためのハザードマップの策定、充実を図っていくべきであるといった考えを明確にしている。さらに、災害対策基本法上の『避難』の考え方についても、ハザードの種類、規模に応じた適切な避難を選択するためには、必ずしも第六十条第一項に示されている『立ち退き避難』が想定され

ているが、かならずしも適切な避難とはいえないこともあり得るばかりでなく、条文の誤解を生じる恐れもあることが言及されている。さらに、この報告書では、図 1.1.4 に示す避難勧告等の発令・解除（風水害編・土砂災害編）のフローチャートも添付されており、国・都道府県及び市町村は明確な判断基準を作成するための方向性を示したともいえる。

以上のような災害事例とそれを踏まえた政府等の対応の中で、ここ 10 年間での変遷を見てきたが、現在では犠牲者をゼロにするための具体的な方策というのが求められていることは事実であろう。しかし、これを実現するには、先にも述べたが行政、住民、専門家等いずれも『人』であるために、非常に難しい側面を持っている。さらに言えば、従来の河川行政で対象にしてきた川そのもので洪水防御するという開発行為ではどうすることもできない次元にきているものと考えられる。片田ら⁴⁹⁾は、近年の豪雨災害における行政の対応と日本の防災理念の限界と弊害について言及し、犠牲者ゼロをいかにして実現するのかについて理念的な提案をおこなっている。自然外力は広範囲に影響を与えるが、防災体制を考えると、行政単位ではなく、より小さい地域例えば自治防災会や小学校などの単位でのきめこまかい情報を共有できるかどうかが鍵であり、そのために行政と住民は互いの目の届く範囲での対応が求められるものとする。

避難勧告等の発令・解除フローチャート（風水害編）【イメージ図】

図 1.1.4 避難勧告等の発令・解除のイメージ⁴²⁾

1.2 本研究の目的と構成

1.2.1 本研究の背景と枠組み

(1) 犠牲者ゼロ政策に基づく非構造的対策

政府・都道府県はあくまで河川管理者であり、住民に避難勧告等を発令する立場ではない。そのため、これらの上位機関が優れた技術と防災上重要な情報を持ち合わせたとしても、豪雨時の避難に直接的には繋がらないことから、これらの技術や情報を市町村の防災体制に役立てていくことが必要である。そして、行政と住民が一体となった防災のあり方を考えていく基盤整備が重要であり、これが実現できないと避難の対象者である住民の犠牲者をゼロにすることはできないものと考えられる。

犠牲者をゼロにする防災理念は、社会的には受け入れられるものと考えられるが、実際にどのように進めていくのが問題となる。具体的には、住民への防災教育だけですむのかどうか、行政内部の問題はないのか、いざとなったとき避難する時間を考えて避難勧告等を地域ごとに発令することはできるのかどうか、避難勧告前に遭難しないのか、他の自治体に応援要請はいつすればいいのか、要援護者は避難できるのか、など様々な問題が地域には内在し、理論的なことだけでは解決しないことが多い。本研究では、このような地域に根ざした洪水のリスクに伴う防災上の課題や、行政・住民の互いの防災上の問題を共有するために必要な取り組みについて、以下の認識の下で研究を行っている。

過去の災害での課題、政府等から発行される通達やガイドライン等をふまえると、技術的な要素だけですむ地域防災が確立されるのではなく、浸水による人定被害が発生するリスクの高い地域における自主防災組織や住民と行政が一体となってリスクに対峙するためのしたたかな社会システムの確立が必要であり、これを具現化するための手法を、分野毎の情報を有機的に連携させ実践し、提示することが、本研究の目的の一つとなっている。

(2) 流域治水政策での具体的な非構造的対応の推進と課題

本研究の契機となった、平成 19 年から滋賀県が実施されている湖北圏域水害につよい地域づくり協議会⁵⁰⁾、湖西圏域での同様の取り組みがある。これらの協議会は、滋賀県が「どのような洪水にあっても、人命を守り、壊滅的な被害を防ぐためには、どのように対応すべきか」という視点から治水政策を再検証し、川の中の対策と川の外の対策を並行して治水・減災対策を行っていく施策の下で実施されている⁵¹⁾。現在では6圏域のうち5圏域で協議会を実施している。

これらの圏域では、河川整備計画にもとづく川の中の対策として、河道改修の『ながす』施策やダムなどの『ためる』施策と並行して、『そなえる』対策を実施している⁵¹⁾。特に、『そなえる』対策は、いわゆるソフト対策を実施していくことを主眼としているが、国や県といった上位機関の推奨するメニューを市町に実施してもらうことを一切していない。この協議会の主体は、国・県・市町の行政機関であるが、住民の身の安全を直接的に担う市町が具体的な施策を行っていくために、市町が抱える防止上の課題を共に考え、国や県が必要な技術的な支援をしていくという役割の中で行われている。

湖北圏域では、平成19年11月に発足した当時は2市6町（長浜市、米原市、虎姫町、湖北町、高月町、木之本町、余呉町、西浅井町）だったが、平成22年1月に虎姫町と長浜市が合併し、現在の2市のみとなった。一方で、湖西圏域においては、高島市のみとなっており、協議会という形ではまだ設立に至っていないが、本研究で対象にした一部のエリアで技術的な検討は始まっている。

湖北圏域ならびに湖西圏域における市町は、従前から水害や土砂災害に対するソフト対策として、法的に作成・配布が義務づけられているハザードマップや防災意識を高揚するための講演会などの防災教育を実施している。しかし、全国で毎年のように起こる災害を目のあたりにしながらも、洪水氾濫や地すべり・土石流などに対して、これらの圏域内の行政・住民ともに、身を守ることができるのかどうか問われた。特に、問題となったのが、以下の点である。

- ✓ 指定避難所は、地震しか想定しないため、水害（あるいは土砂災害）における指定避難所が安全な状態かわからない。
- ✓ 市町の防災担当者は、避難勧告・指示を発令するための基準を持っていないため、発災後の対応になる可能性がある。
- ✓ 避難勧告・指示の発令をしても、市町全体に出すことになる。その場合、避難所の開設が間に合わない。

以上のような課題は、ハザードマップでは知り得ない情報であり、避難のタイミングや発令対象地域などの基準を決めるには、ハザードマップでは情報が不足していることに起因している。一方で、現在指定している避難所の氾濫時の安全性も評価されていないために、住民を逃がすのが適切かどうか判断できない状況にあることも理解しておく必要がある。このような状況では、いざ洪水による破堤が発生しても、事前に把握している情報が役立てられない状況になり、避難による身の安全を確保することもままならないことが容易に想像できる。

(3)避難判断・行動に関する研究課題

洪水氾濫に伴う避難行動に関する研究として、避難判断基準を設定した上で、避難対象者に着目し、避難成功率の向上に対する知見を得ようと試みた研究が多い。例えば、西原⁵²⁾は洪水氾濫の解析結果から住民の避難についてオペレーションリサーチの最短経路選定手法を応用し、洪水氾濫情報を活用した住民の避難評価システムで旧巨椋池干拓流域における適用性について研究を行った。その中で、避難誘導體制の確立と氾濫区域内の避難施設の活用が必要であることを指摘している。一方で、住民の避難行動が現実的には複雑であることから、単純な仮定の下で議論が行われていることや、行政から住民への明確な避難勧告等の発令基準等の検討が十分でないままに議論が行われている。

高橋・中川・東山⁵³⁾は、氾濫解析に基づく避難行動の計算に用いる避難ネットワークを明確に位置づけることにより、氾濫水の挙動を考慮した避難行動の予測手法について提案

した。さらに、氾濫水のくる方向に住民が避難するといった現実にはそぐわないことが起こりうることから、避難地、避難経路の選択の際に氾濫範囲などの水理条件を付加することで現実に近いモデルとすることを検証している。さらに、避難勧告の発令の時期が早く出し過ぎても、かえって危険な方向に避難したり、発令が遅い場合、避難所要時間が増加したりすることを指摘している。また、実際には発令して避難しない人や避難の必要がない住民を考慮するなどの、より現実に近い計算上の設定を課題としてあげている。また、中川・高橋・澤田・石橋⁵⁴⁾は、同様の方法をGISに展開し、土石流氾濫区域内の避難行動についても考察し、避難することを意思決定するための付加的な時間の評価、気象条件や地形的な条件による歩行速度の変化について組み込む必要があることを指摘している。

高棹・椎原・堀⁵⁵⁾は、水害時の避難行動の制御方法や情報の伝達方法を分析するために、現地調査や経験的・常識的に把握されている人間の行動様式などの行動パターンを、AI手法（プロダクションシステム、ファジィ推論）を用いて蓄積し、住民の避難行動をそのメンタルな意思決定過程を含めてシミュレーションする概念モデルの開発を試みている。

一方で、平成4年以降にPCのCPUの速度が飛躍的に向上したことを受け、氾濫流の予測とGISを用いた避難行動や水防活動の支援に向けた研究開発が、飯田ら⁵⁶⁾、平川ら⁵⁷⁾、安田ら⁵⁸⁾⁵⁹⁾によって行われている。これらの研究では、氾濫解析に求める時間的条件や行政や住民の意思決定に必要な時間を考慮した表示方法などを議論し、システム化に向けた方向性について議論されている。一方で、この研究で対象にしている氾濫限の範囲は限定されており、将来的な危機管理のための開拓的な研究という位置づけであると考えられる。当時の大型計算機やPCのスペックの状況から、リアルタイムでの河道や氾濫を追跡するには、計算時間の点で無理が生じていたと推察されるとともに、システムの機能として限定的な機能しか実現できなかったものと考えられる。

さらに、これらの氾濫解析や避難行動、マッピング技術を駆使し、片田・桑沢⁶⁰⁾は、ダム機能を考慮したダム下流域の氾濫対策のためのシミュレーション・システムを開発している。このシステムは、水理的な追求という側面ではなく、ダムの効果と下流の氾濫、下流の対策といったことを住民と一体となって考えていくためのルーツとして開発している側面があり、今後の洪水対策を意思決定していく上で、避難シミュレーションも可能なシステムは、洪水対策の合意形成に大きな寄与を与える可能性がありことが期待される。

従来から、氾濫水理、認知・行動心理といった様々な側面や、それ実現するための統合的な情報技術的の進歩を背景の下で検討が行われてきた。しかしながら、いずれもシミュレーションの技術を確立することが学術的な興味となり、それが先行していたことも否定できない。このような研究動向とは別に、平成10年以降頻発する水害への寄与を期待する・しないという議論の前に、もっと防災上の初歩的な課題が浮き彫りになっている。すなわち、シミュレーションを基礎とした住民への防災教育でいくら自助の意識付けを図っても、避難勧告等を発令する側に術がないのであれば、一体となった減災対応は実現不可能である。牛山⁶¹⁾は、多発する豪雨災害に対して、市町村による独自の防災体制の改善には限界があることを指摘している。これは、防災情報の整備、職員の研修などを実施し、一定の効果を上げていることが期待される反面、指定避難所の選定に浸水の影響が考慮されてい

ないことや、休日夜間の職員の召集の遅れに対する改善という教訓が市町村に波及していないことを調査結果として報告している。一方で、児玉等⁶²⁾は、避難準備情報の導入に伴う避難情報の段階的に発令することによる住民の受容構造について明らかにした。さらに、避難情報が段階的に発令されることによって、住民の家財保全行動や避難準備行動は促進され、事前に情報を得ている住民ほど次に発令される情報を取得しやすいという効果がみられた。その反面、避難情報に段階性があるために、多くの住民が、避難は避難勧告ではなく最終的に発令される避難指示で行う意向をもつ傾向にあること、また、避難準備情報については、その発令に関して住民は肯定的に捉えているものの、早い段階で発令されるが故に情報を軽視する傾向にあることなどが明らかとなった。これらの結果を受けて、避難情報が活かされるためには、情報の受け手である住民の災害情報リテラシーの向上が必要不可欠であることを指摘している。

また、児玉等⁶³⁾は、平成19年9月台風9号災害における市町村の防災担当者への調査から、土砂災害警戒情報や河川水位情報といった防災情報を活用している反面、避難勧告・指示の発令の判断が難しいと認識している結果を得ており、国・都道府県の意図と反していることや、これらの情報を整備し運用について上位行政機関の認識のずれを明らかにしている。また、住民においては、災害情報や避難に関する情報を、その重要度の区別なく捉えている可能性があり、結果として避難の必要性を伝えるような重要な災害情報までもが共倒れする可能性があること指摘している。そのため、市町村といった基礎自治体は、防災情報を活用した地域独自の基準を検討することや、躊躇なく発令基準に基づく避難情報を伝達するためには、住民と行政との認識の共有化を図るためのリスク・コミュニケーションが必要であることを提案している。また、避難準備情報、避難勧告や指示の発令による住民の受容について調査している。これによれば、避難準備情報による住民が情報収集するという行動の促進効果は期待できるが、避難については、避難勧告よりは最終の指示で避難を行う傾向があると指摘している。さらに、避難準備情報に対して住民は肯定的な評価をしているが、早期の情報提供は情報を軽視する可能性があることも問題点として指摘している。

以上のような、行政内部の防災体制の課題、避難勧告等の防災情報に対する住民の受容の課題は、社会的に解決すべき重要なことである。これに対して、金井等⁶⁴⁾は、避難情報の潜在化するメタ・メッセージ効果と住民の理解特性に着目し、洪水災害時の対応行動意向を比較する情報提供実験を行った。これによれば、浸水リスクの認知の低い住民は、自宅での垂直避難が危険であるにもかかわらず、メタ・メッセージ効果により、それを促してしまう可能性があることを確認している。一方で、浸水リスクの認知の低い住民に対しては、適切でない行動を促すような負のメタ・メッセージ効果は確認されなかったことから、指南する行動に関する情報を提示することによって、適切な対応行動を促すことが可能であることを考察している。このような研究成果は、今後の避難判断基準の設定とそれに伴う避難行動の決定において、重要な知見を示したものである。このような研究は、藤井⁶⁵⁾や吉川等⁶⁶⁾が指摘するように、安全と安心をどのように融合させていくのかという議論に帰着するものと考えられる。すなわち、本研究で対象にしている、洪水時の避

難判断は、そもそも誰が誰のためにするのか、それは何をもたらすのかという問いに対して、技術的な尺度から計れる安全と専門家ではない人々が感じる安心をスパイラル的に向上させるために、行動を決定する最小単位である地域、地区が持つべき命を守る基準を作成し、それを官・民の協働で実行していくことが課題解決の1つの方向性と考えられる。

本研究では、以上のような課題解決の一つとして、まず、氾濫解析により氾濫原の安全度を評価し、明確な基準を持つために必要な基礎的な検討を行うことを目標としている。すなわち、氾濫原における地区毎の浸水リスクを踏まえた避難勧告等の発令基準や住民や自主防災組織が独自にもつ避難判断基準が設定することを目的とした。さらに、これらの基準を設定することによって、行政と住民・自主防災会におけるリスク・コミュニケーションの一助となることが期待できる。すなわち、これらの基準を基本にして、互いの役割や行政への支援について議論ができることや、従来のような地区に分け隔て無い一律の避難勧告等の発令ではなく、地域の特性に根ざした基準とすることができる。これにより、洪水氾濫前後において、行政や住民が自律的に避難判断に基づく行動ができるようになるものと期待するものである。

(4) 河川情報の充実に向けた研究課題

近年、IT技術の飛躍的な進歩と災害時の情報伝達の課題から、政府・都道府県は防災情報の一元化に向けた取り組みを実施してきた。その代表的なものとして、『川の防災情報』⁶⁷⁾『統一河川情報』⁶⁸⁾や都道府県の河川・土砂災害情報のポータルサイトの立ち上げ⁶⁹⁾とその基礎データ収集のための観測所の整備とリアルタイムデータ(10分を基本)の提供が実現している。これらの情報網と収集されるリアルタイムの雨量・水位データを活用していくことが考えられるのは必然的なことである。

一方で、雨量のデータについては、雨量計とは別に、気象観測用レーダの開発により、これらのデータも利用できる環境が整備されてきた。また、レーダの活用は雨量の面的分布(導入当時は5km²、平成15年からは1km²の空間解像度)を把握することもあるが、これを初期条件とした気象予測技術が著しく進展してきた。現在では、平成23年度から試験運用されているXバンドMPレーダ⁷⁰⁾による250m四方メッシュといった空間解像度が高く、1分間隔という短時間で雨量の面的分布も把握が実現している。

以上のような河川情報のリアルタイムデータと気象予測データを活用することで、それまで経験的な手法も取り入れた洪水予測の技術が飛躍的に進展した。特に、(財)河川情報センターが中心となり、国土交通省は、直轄管理河川に分布型流出モデルを組み込んだ洪水予測システム⁷¹⁾⁷²⁾⁷³⁾を導入している。この分布型流出モデルは、地下水を含む水循環機構をモデリングしたものであり、世界的に汎用化されたモデルが公表されている。計算時間がかかるために予測へ適用されてこなかったが、CPUの処理速度の飛躍的な向上により、実用的になった背景がある。現在では、ほとんど国管理河川区間においては、このモデルを用いた洪水予測システムが運用され、洪水予警報、水防警報の発令に資する情報提供を行っている。

一方で、従来から流出モデルで構成される洪水予測モデルの精度を向上させるための研

究として、観測値に対するシステム方程式のデータ同化手法の適用性の問題や、モデルパラメータの最適値を算出するための数理工学的な研究など、多くの研究が行われてきている。

洪水予測におけるデータ同化手法に関する研究は、現時刻時点の観測値を説明するためのパラメータを逆解析で求めることを目的にしたものが多い。これには、現時刻までの空間状態量を推定することができれば、それ以後の予測段階での精度も向上することを前提としたものである。1970年代には、日野⁷⁴⁾によるカルマンフィルタ理論を基本とした研究が多く、その後、流出モデルでの予測にカルマンフィルタ⁷⁵⁾⁷⁶⁾を適用した事例、さらに統計二次近似理論を適用した洪水予測システムの事例⁷⁷⁾、分布型洪水予測モデルにバイアス補正を考慮したカルマンフィルタを適用した事例⁷⁸⁾等、多くの研究が行われてきた。しかしながら、拡張カルマンフィルタを基本としたフィードバック手法を洪水予測で用いる場合、ヤコビアンを解く必要があることや、計算が不安定になることが指摘されており、非線形の強い現象への適用性を踏まえると、実用的に懸念される特徴もある。一方で、立川等⁷⁹⁾が非線形フィルタリング手法の一つである粒子フィルタ法（Particle filter）を水位予測に応用し、洪水予測への可能性を示した。この手法は、気象分野で多くの研究事例のあるアンサンブルカルマンフィルタと類似した方法⁸⁰⁾で、非線形性が強い現象に対して優れた方法とされ、モンテカルロ近似を用いることから、空間的な状態量を推定する効率的な方法として今後期待される手法である。この非線形フィルタリング手法については、工藤等⁸¹⁾、高崎等⁸²⁾も流出予測モデル（タンクモデル法、貯留関数法）への粒子フィルタ法の適用性について議論している。また、モデルにおける最適なパラメータを求める方法として、遺伝的アルゴリズムを用いた方等の適用性⁸³⁾⁸⁴⁾⁸⁵⁾について検討されており、研究のみならず実務に適用した多くの事例が報告されている。

しかしながら、これらの多くの研究では、洪水予報を求められる10分間あるいは30分間という時間的制約の中で、予測結果を得るための技術的な適用性について、言及されていない。本研究では、この手法を用いて、淀川、吉井川、武庫川といった実際の現場で運用するために、非線形フィルタリング手法の適用性について検討を行った。

避難勧告等の発令等の基準の作成や、洪水予測システムの構築だけでは、氾濫原の危機管理における情報の精度という観点からは不十分であり、洪水氾濫を予測することができれば、行政のみならず住民に有益な情報を提供できることが期待される。これを実現するには、洪水予測システムと連携した洪水氾濫予測システムの設計、構築が必要になるものと考えられる。仲谷⁸⁶⁾⁸⁷⁾は大規模な災害が発生を想定して、防災情報システムという観点を含みながらも、減災に着目したシステムの事例とそのあり方について論じており、減災というのは『備え』ばかりでなく、発災後の復旧や復興にも通じるシステムのあり方が重要であることを指摘している。これと類似した研究として、金澤等⁸⁸⁾も防災・減災に繋がるように、時系列的にかつ視覚的に氾濫流が把握できることだけではなく、その際に行政や住民が必要としている防災情報も合わせて表現する試みを行っている。しかしながら、実現している研究事例は数少ない⁸⁹⁾。

このような動きの中で、洪水予測結果を利用し、氾濫のタイミングやその場合堤内地の

状況などを、いかに早く情報を提供し、地方自治体の避難勧告・指示等の発令にタイミングや住民の避難行動に結びつけられるのかが、定量的な課題ばかりでなくシステムの運用という観点からの課題が残されている。仲谷⁸⁶⁾⁸⁷⁾、大規模災害に対する減災情報システムが、自然の観測や災害の予測を初めとして、復旧・復興の支援、被災者の精神的支援に果たす役割が大きいことを紹介している。

本研究では、定量的な洪水氾濫予測から洪水に対する備えや、リアルタイムで防災・減災を支援する方策について論じることを目的としている。従来の研究では、内外水氾濫を同時にシミュレートできる統合的なモデルを構築し、これを洪水予測と連動させ、将来起こりうる可能性のある内水氾濫や破堤氾濫を河川管理者や地方行政が同時に閲覧できる地理情報システムを構築した事例はない。本研究では、このような従来の研究等で示された洪水氾濫予測の概念を参考にして、新たに氾濫現象を出来るだけ忠実に反映させた水文・水理モデルの構築、行政の防災体制、水防活動、住民への避難判断支援や誘導などに活用できる氾濫予測結果を表示するための地理情報システムを構築することを目的とした。

1.2.2 本研究の構成

近年の災害の発生とその課題について多くの議論がなされ、その対応策について提言されてきたにもかかわらず、毎年のように洪水・土砂災害など豪雨の発生に起因した人的被害、資産被害が起きいている。氾濫原に蓄積された資産を守るという思想に基づく治水計画と、人的被害をできるだけ少なくする治水対策は、基本的には行政と住民のコンセンサスの問題であり、本質的にその対応の方法が異なるものと考えられる。前者は、河川改修、ダム・遊水地、内水排除施設などで防御することを主体とするが、後者は社会・集団心理を基本とした人間の持つ本質的な心理的な問題であると考えられる。

本研究の基本的な問題認識として、自助・共助・公助という行政、地域、住民のそれぞれの立場の行動を、それぞれの主体者自身が考えていくことに限界があるということを前提としている。例えば、洪水氾濫や土石流などが発生する可能性のある地域の住民に、行政から避難勧告を発令したとしても、確実に住民の判断で避難をすることは防災教育だけでは実質難しいと考えられる。さらに言えば、ハザードマップを提示された住民や自主防災組織の力だけで避難計画等を立案することは実質困難であると考えられる。したがって、行政と住民が協働して互いの保有すべき情報を作成し、共有するための活動を推進していくことが、水害・土砂災害といった自然災害に強い人づくり・地域づくりを推進していく上で、最も重要な取り組みと考えている。

従来からの事前の災害対応の重要性は既に多くの研究者が論じているが、本論文は、堤内地における洪水氾濫によるリスクを踏まえ、行政の持つべき避難勧告の発令基準や住民の避難判断・行動基準の具体的な設定方法について、水理、防災的の知見から考察をまとめたものである。さらに、近年の情報通信技術の進展、計算機の実力の飛躍的な向上を背景に、河川管理者が行うべき洪水予測の精度向上、それを利用した洪水氾濫予測手法とその情報の活用についてまとめたものである。

本研究の構成を図 1.2.1 に示す。前半は、洪水氾濫に対する行政・住民の避難のあり方

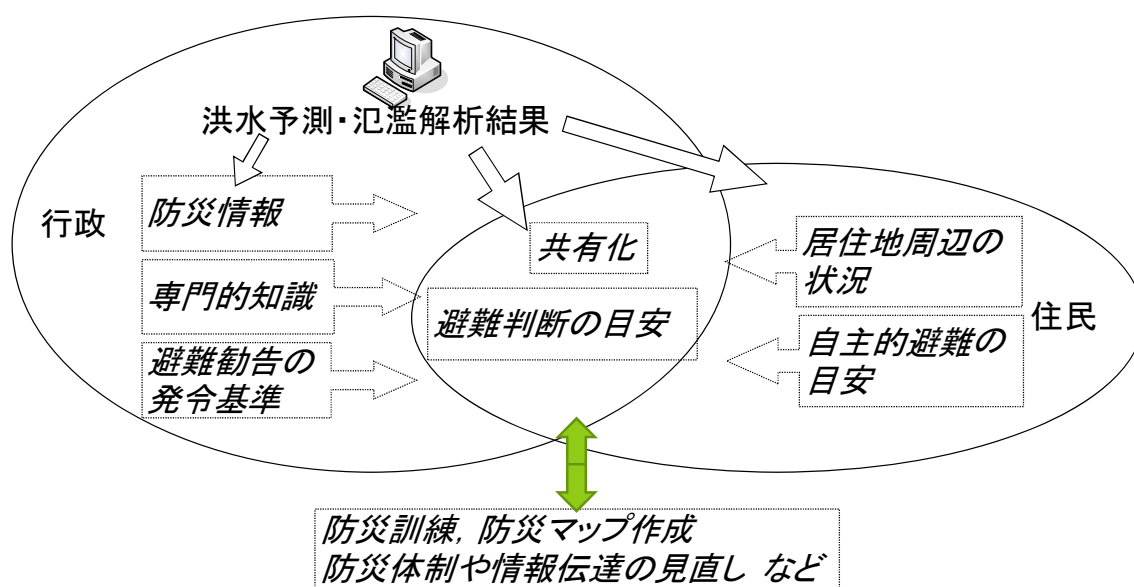


図 1.2.1 本研究の目的と構成

を数値シミュレーション結果から考察したものであり、後半は、行政が洪水を精度良く予測する方法について考察したものである。

以下には、各章の内容を示す。

本章では、長崎水害での大水害後の非構造的な対応の策定から、近年までの災害実態とその後の対応について省庁・地方自治体の答申等についてレビューし、その課題について整理した。さらに、その課題に対する従来の研究等や具体的な災害対応の実態を明らかにした上で、本研究の位置づけ、目的についてとりまとめた。

第2章～第5章では、滋賀県が推進する流域治水対策の支援した成果の一部であり、以下のような内容で構成される。

第2章⁹⁰⁾⁹¹⁾は、行政が発令する避難勧告・指示を受けた地域住民や社会福祉団体が避難できるのかどうかを確認するために、災害図上訓練（DIG）を実施した内容とそのツールの有効性について述べる。さらに、2回のDIGから得られた社会福祉団体の避難計画のあり方、課題と今後の解決策について述べる。

第3章⁹²⁾⁹³⁾は、洪水予報に指定されている河川を対象にした基礎自治体が地域防災計画に記載すべき情報として、避難勧告・指示の発令基準の設定について述べる。この設定に際し、まず流域内の自治会に洪水災害に対する備えとして、伝承や経験的に危険と認識している箇所について調査し、その危険箇所と滋賀県が収集している河川水位情報との関連性を明らかにし、地域住民に提供する情報のあり方について述べる。さらに、内水氾濫および外水氾濫を追跡できる平面二次元氾濫解析を行い流域内の人的被害・歩行困難などの指標からリスクを把握した。避難行動が必要な地域を選定した上で、行政が発令する情報の重要性や前述の危険箇所の情報と連動した基準のあり方について考察し、具体的な基準の設定を行った事例について述べる。

第4章⁹⁴⁾⁹⁵⁾は、第3章で議論した洪水予報や水位情報周知河川といった法的指定を受け

ていない中小河川の氾濫による住民への避難指示・勧告の発令基準の基本的な考え方について検討した。まず、対象地域内の氾濫リスクを整理し、滋賀県高島市周辺の地区毎に、行政が発令する勧告のタイミングとそれと連動した地区内の居住地周辺で起こりうる氾濫水理現象を整理し、避難判断基準として整理した。この一連の検討においては、避難所への移動と一時的に家屋の2階以上に避難することを前提し、対象地区毎の避難判断基準の作成方法について述べる。

第5章⁹⁶⁾は、地先の洪水対応としての考え方として、堤外地、堤内地の洪水対応の分け方が住民に理解しやすいこと、河川管理者とそれ以外の関係者との関係を明確にすること、これらを意識しつつも、協働で減災対策を実施するべきと考えている。このうち、堤内地の洪水対応を具体的に推進するために、人的被害が発生する可能性が高い米原市村居田地区を対象にした『備える対策』の実現に向けた協議を行った経緯を説明する。約2年間で実施した地区と行政の議論と、その合意過程、施策の実施内容について説明する。さらに、そのプロセスが、既往の研究等でのリスク・コミュニケーション手法とどのような関係にあるのかを明確にするとともに、非構造的な洪水対策を実施する上で、リスク・コミュニケーションによる合意形成において、リスク・マネジメント手法が有効であることを示した。

現在整備されている情報通信網とそれを利用した観測体制が確立されている中で、降雨予測データから洪水予測の精度が従前に比べ飛躍的に向上している。これを背景に、第6章～第9章では、洪水予測システムの精度向上とそのシステムの設計・構築に関する実務上の課題に対する検討を行った。さらに、洪水予測結果から、いつどこで破堤するのかという不確実性の高い現象を想定した洪水氾濫予測とそのシステムの設計・構築について検討を行った。

第6章⁹⁷⁾⁹⁸⁾では、避難勧告・指示や水防団への出動命令といった行政が防災行動を意思決定する際に、河川水位の上昇を予測することが重要であり、以下の3つの点について研究を行った内容をとりまとめた。

- ①分布型流出モデルの定数設定と実績洪水との適合性に関する事例的研究
- ②分布型洪水予測モデルをシステムで稼働させる際に、経験的なフィードバック手法と確率的な予測手法を用いた場合の適用性に関する研究
- ③水系内に存在しているダムが下流の浸水被害を軽減するため、洪水調節方法の選択が可能なシステムの機能と構成に関する研究

上記③については、洪水予測モデルの特性や最適な選択に関する研究を踏まえて、精度良く予測できるかを追求し、ダムの洪水調節に対する新たな社会的なニーズを踏まえたものである。

まず、一級河川吉井川水系を対象に分布型流出モデルについて概説し、定数の設定、実績洪水での精度検証を行った。次に、実績洪水で精度が検証できた流出モデルをシステムに組み込む前段階として、現状の洪水予測システムのデータ・フローを踏まえ、将来の流

出量を求めるために現時刻の観測値に対する計算結果との適合を図るフィードバック手法について、経験的な方法と確率的な手法（粒子フィルタ法）を用いた場合の比較を行い、近年注目されている粒子フィルタ法が経験的実績のある手法に比べて劣らない結果となることを示した。

さらに、このようなモデルを用いて、ダムが下流の水位に影響を与える場合、下流の浸水被害を軽減するために必要な操作が求められている。そこで、システムで単純に降雨～流出過程を予測し河川水位に関する情報を提供するだけではなく、ダムや下流の流域からの流出量を予測し、ダムにおける放流量を、下流の水位を把握し制御していくための必要な機能とそのシステム構成について検討を行った。

第7章⁹⁹⁾では、近年モンテカルロ近似を利用した粒子フィルタが注目されて、洪水予測への適用について報告されている。現在運用中の武庫川流域洪水予測モデルを例にとり、確率論的な水位情報を提供する洪水予測システムの可能性・拡張性について検討した。まず、入力データの誤差として、洪水時の予測雨量と実測雨量の誤差分布を、二次元指数分布で近似することができることを示した。一方で、過去から現時刻までのシステム方程式から算定される推算水位を実績水位に合わせるために状態量を設定し、この状態量の誤差分布を粒子フィルタと結合することで、分布型流出モデルによる河川水位の確率分布の予測の可能性について検討した。その結果、洪水予測結果を一意的な情報として提供することに加えて、到達する水位の確率を表現することができることを示した。

第8章¹⁰⁰⁾¹⁰¹⁾では、淀川水系洪水予測システムの構築にあたり、淀川三川合流区間を対象にした不定流モデルによる水位予測のフィードバック手法について論じる。研究対象とした淀川三川合流区間（木津川・宇治川・桂川）は、背水の影響を強く受け、複雑な流況となるような場である。本研究では、淀川水系の洪水予測システム全体の一部として構築した背水区間の水位予測システムのフィードバックとして、**Particle Filter**法を適用し、将来の予測水位を高い精度で推定する方法を提案した。

第9章¹⁰²⁾¹⁰³⁾では、堤内地を対象に、避難誘導や水防体制、復旧の効率的に行うために、内水および外水氾濫を予測するモデルと、これを組み込んだシステムの設計・構築について検討した結果を示す。まず、九頭竜川を対象にした内外水氾濫解析モデルについて概説し、そのモデルの適合性について検証した。次に、開発したモデルの入力条件として洪水予測による上流端流量の入力と、堤内地の内水氾濫解析モデルを連動させたモデルを、組み込んだシステムの設計・構築について検討した。さらに、システムからユーザに提供する情報として、浸水深や流速といった基礎情報の他に、計算結果に基づく水平避難の是非を議論するために必要な歩行困難なエリア、地区毎の時間的な浸水過程や避難所の浸水を予測する機能を開発した。また、実際の氾濫を考慮するために、破堤時間まで遡って、再計算する機能を開発した。これらを、一連のシステムとして機能させるために必要なソフトウェアの構成やハード構成についても検討を加え、氾濫予測システムの設計・構築に関する知見をとりまとめた。

第10章では、本論文で得られた知見と結論をとりまとめた。さらに、今後の防災・水防上の課題について整理し、今後の研究の方向性について考察した。

参考文献

- 1) 社会資本整備審議会河川分科会 気候変動に適応した治水対策検討小委員会：水関連災害分野における地球温暖化に伴う気候変動への適応策のあり方について，2007.11
- 2) 高橋和雄・橋本晴行・今村文彦・北村良介・清野純史・立木茂雄：長崎大水害から20年―その教訓と現況，自然災害科学，22-2，pp.125-147，2003
- 3) 長崎県土木部：長崎県防災都市構想策定委員会報告書，1984.3
- 4) 国土交通省河川局：災害列島 2000
- 5) 群馬大学工学部建設工学科都市工学講座片田研究室：平成 12 年 9 月 東海豪雨災害に関する実態調査 調査報告書，2001.1
- 6) 都市型水害緊急検討委員会 国土交通省河川局および都市局：都市型水害対策に関する緊急提言，2001.
- 7) 国土交通省河川局：災害列島 2004 2003 年災害を振り返る，2004.3
- 8) 国土交通省国土技術政策総合研究所：平成 16 年風水害の特徴と今後の課題，国土技術政策総合研究所資料 No.246，2005.3
- 9) 気象庁報道発表資料：平成 16 年夏から秋にかけての集中豪雨・台風等について，2004.12
- 10) 気象庁：気候系監視報告，2004.6
- 11) 気象庁気候・海洋気象部：エルニーニョ監視報告，No.142～145
- 12) 豪雨災害対策総合政策委員会：総合的な豪雨災害対策についての緊急提言，2004.12
- 13) 国土交通省河川局河川計画課：豪雨災害対策緊急アクションプラン，2004.12
- 14) 国土交通省河川局：災害列島 2006 2005 年災害を振り返る，2006.3
- 15) 国土交通省河川局：災害列島 2007 2006 年災害を振り返る，2007.3
- 16) 国土交通省河川局：災害列島 2008 2007 年災害を振り返る，2008.3
- 17) 国土交通省河川局：災害列島 2009 2008 年災害を振り返る，2009.3
- 18) 藤田一郎：都賀川水難事故調査について，土木学会都賀川水難事故調査団報告書 pp.7，2009.5
- 19) 宮本仁志・門田朗：Ⅲ. 突然の濁流の発生条件について，土木学会都賀川水難事故調査団報告書，pp.14-18，2009.5
- 20) 国土交通省河川局：災害列島 2010 2009 年災害を振り返る，2009.3
- 21) 牛山素行・片田敏孝：2009 年 8 月佐用豪雨災害の教訓と課題，自然災害科学，29-2，pp.205-218，2010
- 22) 国土交通省河川局：災害列島 2011 2010 年災害を振り返る，2011.3
- 23) 国土交通省河川局：災害列島 2012 2011 年災害を振り返る，2012.3
- 24) 前出 6)
- 25) 日本国政府：水防法，1949.6，改正 2001.6
- 26) 国土交通省河川局治水課：洪水ハザードマップの作成の手引き，2005.6
- 27) 前出 13)

-
- 28) 前出 12)
- 29) 日本国：水防法，1949.6，改正 2005.6
- 30) 大規模降雨災害対策検討会：洪水氾濫時・土砂災害発生時における被害最小化策のあり方，2005.12
- 31) 洪水等に関する防災用語改善検討会：洪水等に関する防災情報体系のあり方について（提言），2006.6
- 32) 文部科学省・経済産業省・気象庁・環境省：IPCC 第4次評価報告書統合報告書，2007.11
- 33) 国土交通省社会資本整備審議会河川分科会：水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について（中間とりまとめ），2008.6
- 34) 国土交通省社会資本整備審議会河川分科会：水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について 報告書，2009.6
- 35) 国土交通省河川局・中小河川における局地的豪雨対策 WG：中小河川における局地的豪雨対策WG報告書，2009.1
- 36) Rijkswaterstaat: : Flood Defences Act, policy creating space for the River, Delft, The Netherlands, 1998.1
その他，Netherlands Hydrological Society : Water in the Netherlands managing checks and balances, NHV-Special 6
- 37) IWR : Flood Risk Management Approaches As being practiced in Japan, Netherlands, United Kingdom and United States, IWR Report No:2011-R-8, 2011.9
- 38) Atlas of Flood Maps, Examples from 19 European countries, USA and JAPAN, 2007.11
- 39) 日本国：災害対策基本法，1959.11 改正 2011.12
- 40) 前出 21)
- 41) 牛山素行，高柳夕芳：2004～2009 年の豪雨災害による死者・行方不明者の特徴，自然災害科学，29-3, pp.355-363, 2010.
- 42) 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，2009.3
- 43) 内閣府：災害時要援護者の避難支援ガイドライン，2005.3
- 44) 内閣府：災害時要援護者の避難支援ガイドライン，2006.3
- 44) 災害時要援護者の避難対策に関する検討会：災害時要援護者の避難対策事例集，総務省消防庁発行，2010.3
- 45) 内閣府・総務省・文部科学省・厚生労働省・農林水産省・国土交通省・気象庁：平成21年7月中国・九州北部豪雨及び平成21年台風9号に伴う大雨を受けての対策，2009.8.
（行政文書 通知 府政防第588号／消防災第328号／21文科施企第17号／社援総発0813第1号／21経営第2595号／国河防第292号／気企第99号）
- 46) 内閣府：大雨災害における避難のあり方等検討会報告書，2010.3
- 47) 愛知県清洲市：<http://www.city.kiyosu.aichi.jp/moshimo/suigaitaiou-book.html>
- 48) 京都市：<http://www.city.kyoto.lg.jp/suido/page/0000089718.html>
- 49) 片田敏孝・児玉 真・金井昌信：近年の豪雨災害対応にみるわが国の防災基本理念の限界と弊害，日本災害情報学会，第11回研究発表会予稿集，pp.243-248，2009
-

- 50) 滋賀県流域治水政策局：湖北圏域水害・土砂災害に強い地域づくり協議会，
<http://www.pref.shiga.jp/h/kako/bousai/suigainitsuyoi/setsumei.html>
- 51) 滋賀県：滋賀県流域治水基本方針－水害から命を守る総合的な治水を目指して－，
2012.3
- 52) 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，京都大学学位論文，1984.1
- 53) 高橋保・中川一・東山基：洪水氾濫水の動態を考慮した避難システムの評価に関する
研究，京都大学防災研究所年報，第32号 B-2，pp.757-780，1989.4.
- 55) 中川一・高橋保・沢田豊明・石橋晃睦：GISを用いた避難行動の解析－岐阜県吉城群
上宝村枳尾地区周辺を対象に－，京都大学防災研究所年報，第40号 B-2，pp.397-407，
1997.4.
- 55) 高棹琢馬・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.15-25，1995.2.
- 56) 飯田進史・舘健一郎・武富一秀・川本一喜・金木誠・平川了治・谷岡康：水害時の避難解析
システムの構築と危機管理対応支援の適用性検討，河川技術論文集，第8巻，2002.6.
- 57) 平川了治・舘健一郎・武富一秀・安田浩保・金木誠・飯田進史・五十嵐孝浩・谷岡康：リアル
タイム氾濫解析システムの構築とその活用の方角性について，河川技術論文集，第9巻，
2003.6.
- 58) 安田浩保・後藤智明・山田正：浸水域予測モデルに基づく水防活動の支援システムの
構築に関する研究，河川技術論文集，第8巻，2002.6.
- 59) 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，pp.1-17，2003.8.
- 60) 片田敏孝・桑沢敬行：ダム機能を考慮した下流域の洪水氾濫対策のためのシミュレー
ション・システムの開発，土木学会論文集 D Vol.65，No.3，pp.280-292，2009.7.
- 61) 牛山素行：豪雨災害の多発が市町村の防災体制改善に及ぼす影響，災害情報 No.4，
pp.50-61，2006.
- 62) 児玉真・木下猛・片田敏孝：避難準備情報の導入に伴う避難情報の段階的発令とその
住民受容に関する研究，災害情報 No.6，pp.51-60，2008
- 63) 児玉真・本間基寛・片田敏孝・若田部純一：豪雨災害関連情報の充実化とその下での
自治体対応にみる現状と課題，災害情報 No.7，pp.75-83，2009
- 64) 金井昌信・島晃一・児玉真・片田敏孝：洪水避難に関する行動指南情報のメタ・メッ
セージ効果の検討，災害情報 No.9，pp.161-171，2011
- 65) 藤井聡：安全と安心の心理学，日本建築学会総合論文誌 Vol.7～都市・建築に関わる安
全・安心のフロンティア～，pp.29-32，2009
- 66) 吉川肇子・白戸智・藤井聡・竹村和久：技術的安全と社会的安心，社会技術研究論文
集，Vol.1，pp.29-32，2003
- 67) 新井田有二：これからの河川情報システムについて，平成17年度 河川情報シンポジ
ウム，pp.4-1-4-8，2005.2
- 68) 清水裕・福永健・太田垣暁・蠣崎哲・佐々木 晋：統一河川情報システム（表現と活用

- シナリオ), 平成 16 年度河川情報シンポジウム, pp.1-9, 2004.2
- 69) 北川明: 統一河川情報システムの運用と展望, 平成 21 年度 河川情報シンポジウム, pp.1-8, 2009.2
- 70) 国土交通省河川局: Xバンドレーダの導入について, 2008.12
- 71) 深見親雄・青木智司: レーダ雨量計を用いた分布型洪水予測システム, 平成 17 年度河川情報シンポジウム, pp.1-8, 2005.2
- 72) 深見親雄・高橋直人: レーダ雨量計を用いた分布型洪水予測システム (続報), 平成 18 年度河川情報シンポジウム講演集, pp.5-1-5-8, 2006.2
- 73) 深見親雄・吉村英司・黒田尚吾・井上 靖生: FRICS における分布型洪水予測モデル検討の方向性と課題, 平成 22 年度河川情報シンポジウム講演集, pp.7-1-7-2, 2010.2
- 74) 日野幹雄: 水文流出系予測へのカルマン・フィルタ理論の適用, 土木学会論文報告集, No.221, pp.39-47, 1974.1
- 75) 高棹琢馬・椎葉充晴: 状態空間法による流出予測—kinematic wave 法を中心として—, 京都大学防災研究所年報, Vol.23 B-2, pp.211-226, 1980.4
- 76) 寶馨・高棹琢馬・椎葉充晴: 洪水流出の確率予測における実際的手法, 水理講演会論文集 No.28, pp.415-422, 1984.2
- 77) 高棹琢馬・椎葉充晴・富澤直樹: 統計的二次近似理論を適用した流出予測システムの構成, 京都大学防災研究所年報, Vol.27 B-2, pp.255-273, 1984.4
- 78) 佐山敬洋, 立川康人, 寶馨: バイアス補正カルマンフィルタによる広域分布型流出予測システムのデータ同化, 土木学会論文集, 土木学会論文集 B, 64(4), pp.226-239, 2008.
- 79) 立川康人, 須藤純一, 椎葉充晴, 萬和明, キムスンミン: 粒子フィルタを用いた河川水位の実時間予測手法の開発, 水工学論文集, 第 55 巻, pp.S511-S516, 2011.
- 80) 例えば, 片山徹, 非線形カルマンフィルタ, 朝倉書店, 2011.
- 81) 工藤亮治, 近森秀高, 永井明博: 粒子フィルタを用いた河川流域における実時間洪水予測, 農業農村工学会論文集, No.259, pp.17-25, 2009.
- 82) 高崎忠勝・河村明・天口英雄・石原成幸: 粒子フィルタを用いた都市貯留関数モデルによる実時間洪水予測特性, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.68, No.4, I_511-I_516, 2012.2
- 83) 田中丸治哉: 遺伝的アルゴリズムによるタンクモデル定数の同定, 京都大学防災研究所年報, Vol.36 B-2, pp.231-239, 1993.4
- 84) DUAN, Q., SOROOSHIAN, S., GUPTA, V. : Optimal use of the SCE-UA global optimization method for cali-brating watershed models, Journal of Hydrology, Vol. 158, pp. 265-284. 1994 .1
- 85) 田齋秀章, 平松和昭, 森牧人, 原田昌佳: SCE-UA法を用いたTOPMODELパラメータの特性評価, 九州大学大学院農学研究院学芸雑誌, 61(2), pp.261-272, 2006.
- 86) 仲谷善雄: 大規模災害に対する減災情報システム 前編, 情報処理 45 巻 11 号, pp.1164-1174, 2004.11
- 87) 仲谷善雄: 大規模災害に対する減災情報システム 後編, 情報処理 45 巻 12 号,

- pp.1255-1265, 2004.12
- 88) 金澤延幸・島田健一・横塚尚志：動くハザードマップの操作と運用，平成 17 年度 河川情報シンポジウム， pp.1-8, 2005.2
- 89) 金澤 裕勝・井上 康・藤本 幸司・栗城 稔・布村 明彦：2011 年チャオプラヤ川大洪水と新たな洪水予測システムの開発，平成 24 年度 河川情報シンポジウム， pp.1-11, 2012.12
- 90) 田中耕司・里深好文・花房大輔・中西宣敬・北村祐二：図上訓練による洪水氾濫時の要援護者施設の避難行動とその課題，歴史都市防災論文集，Vol.5, pp.29-36, 2011.7
- 91) 田中耕司・花房大輔・中西宣敬・北村祐二：洪水氾濫における社会福祉団体の避難方法の選択と課題，土木学会論文集 F6 (安全問題) Vol. 67 (2011) No. 2 P I_35-I_40, 2012.1
- 92) 佐々木昌俊・田中耕司・花房大輔・北村祐二：経験的な危険箇所を利用した避難判断基準の設定，土木学会論文集 F6 (安全問題) Vol. 67 (2011) No. 2 P I_47-I_52, 2012.1
- 93) 花房大輔・橋本将明・佐々木昌俊・田中耕司・西居直史・中島敏雄・饗庭啓良：避難勧告・指示に資するきめ細かい河川情報に関する研究，土木学会安全問題研究論文集，Vol.5, pp.211-216, 2010.11
- 94) 田中耕司・原田翔太・岡田裕行・瀧健太郎：中小河川群の氾濫域における地区別避難判断基準の設定，土木学会論文集 B1(水工学) Vol.68, No.4, I_1087-I_1092, 2012.2
- 95) 原田翔太・村岡治道・田中耕司・七里豊伸・手塚聡・瀧健太郎：中小河川の氾濫原における水害リスクを考慮した地区別避難判断基準の設定，土木学会論文集 F6 (安全問題) Vol. 68 (2012) No. 2, P I_18-I_23, 2013.1
- 96) 田中耕司・大久保省良・村岡治道・北村祐二・前田善一・小根田 康人：洪水によって人的被害が想定される地区の減災対策，土木学会論文集 F6 (安全問題) Vol. 68 (2012) No. 2, P I_53-I_60, 2013.1
- 97) 田中耕司・杉浦正之：歴史的風致地区の浸水被害軽減を支援する洪水予測システムの精度向上，歴史都市防災論文集，Vol.6, pp.111-118, 2012.7
- 98) 坂井広正・田中耕司・杉浦正之・河内敏雄・和田英治・川島明昌・藤原武夫：洪水予測シミュレータの開発，第 36 回土木情報利用技術講演集，pp.183-186, 2011.9
- 99) 田中耕司・辻倉裕喜・大八木豊・杉浦正之：予測雨量誤差を考慮した洪水予測システム開発，土木学会論文集 B1(水工学) Vol.69, No. 4, P I_1591-I_1596, 2013.2
- 100) 田中耕司・辻倉裕喜・大八木豊・杉浦正之・森田宏・志賀浩幸・井川智博：淀川三川合流区間を対象にした水位予測システムの開発，河川技術論文集，Vol.19, pp.241-246, 2013.2
- 101) 田中耕司・大八木豊・杉浦正之：粒子フィルタを用いた実時間確率洪水予測システムの開発，第 37 回土木情報利用技術講演集，pp.235-238, 2012.9
- 102) 坂井広正・深草新・原田翔太・田中耕司・井辻英雄・酒井伸一：避難行動を支援するための洪水氾濫予測システムの設計と構築，土木学会安全問題研究論文集，Vol.5, pp.205-210, 2010.11
- 103) Kohji Tanaka, Hiromasa Sakai, Shin Fukakusa, Hideo Itsuji and Shinichi Sakai :

Architecture of real-time flood flow forecasting system contribution to evacuation activity and flood fighting, Oral presentation, Abstract Proceeding, 5th International Conference on Flood risk management, 27-29, 2011.9

第 2 章 洪水氾濫を想定した避難計画策定 における課題と解決策

2.1 はじめに

近年、台風や集中豪雨による浸水被害、土石流・地滑りなどによる土砂災害が多発しており、これらの災害の死亡者のうち高齢者の占める割合が高い。例えば、平成 18 年 7 月の新潟での洪水では、死亡した 15 人のうち 80%が高齢者であり、自立・要介護度の低い高齢者が犠牲になっていることが特徴であったことが報告されている¹⁾。さらに、平成 21 年 7 月に山口県で発生した集中豪雨による土砂災害では特別養護老人ホームの入居者 7 名が死亡している²⁾。これは、今後高齢社会がより進み、介護度の程度に係わらず高齢者を含む災害時要援護者は確実に増えていき、人的被害のポテンシャルが社会的に高くなることを意味している。このような背景の中で、高齢者を含む災害時要援護者への避難時の支援対策を具体的に検討し、実効性のある避難計画を設定することが急務になっている。

内閣府は、2005 年 3 月に「災害時要援護者の避難支援ガイドライン」をとりまとめ、地方自治体に避難支援援助計画の作成を求めている³⁾。この取り組みをより促進するために、平成 20 年 4 月に策定した「自然災害の「犠牲者ゼロ」を目指すための総合プラン」の中で、平成 21 年度までに市村での災害時要援護者の避難支援の取り組み方針（全体計画）などが策定されように促進されてきた。その結果、平成 21 年までには約 8 割、平成 23 年度末には、ほとんどの自治体で策定される予定である⁴⁾。これらの指針は、市村が取り組むべき課題に対して解決するため技術が提供されているものである。しかしながら、社会福祉団体の独自に持つべき避難計画や避難前後の様々な対応を規定するにあたり、現状では行政から与えられるハザードマップの情報しかない。したがって、避難判断や行動の時系列的なシナリオに基づいた、防災訓練等ができない、あるいは作成するにあたって、ハザードマップだけでは情報不足である。

一方で、地方自治体の人材不足、財政の逼迫という経営的な問題も連動し、防災上

の対応が遅れている現実もある。もし、自然災害が発生し避難勧告等の対応が遅れることがあれば、災害時の要援護者のみならず健常者も路頭に迷う可能性があると考えられる。すなわち、防災計画が文書化され、支援のための制度はできたが、実際の洪水等の災害時に実効性がないものとなる可能性が高い。このような避難計画の文書化だけでなく、洪水を想定した場合の時間的な対応が各団体における備えが来ているのかどうかを災害図上訓練や防災訓練によって確認する方法がある。土砂災害によって甚大な被害が発生する可能性の高い地区での避難判断等については、片田等⁵⁾が検討している。しかしながら、本研究で扱っている洪水災害での広域避難を対象にした災害図上訓練から、行政、自主防災組織や社会福祉団体関係者が想定する避難判断・行動に対する課題を、水理解析と合わせて抽出した研究事例はない。

このような背景をうけ、滋賀県では、災害時要援護者への避難支援も含めた流域内の治水対策の問題を行政・自主防災会・住民で共有し、それぞれの役割の中で防災・減災施策の実現可能性について水害・土砂災害に強い地域づくり協議会⁶⁾の中で活発な議論が交わされている。本章は、このような湖北圏域（長浜市・米原市）を対象に、姉川・高時川流域での洪水発生を想定した 2 回（平成 20 年 10 月 22 日／平成 21 年 11 月 30 日）の災害図上訓練が実施された。本章では、この訓練を通して要援護者支援施設（社会福祉団体）の避難計画を考える上で抽出された課題と、湖北圏域全体の避難のあり方に対する解決策について考察した。

2.2 対象とする流域の概要

2.2.1 対象流域の概要

(1) 流域概要

滋賀県長浜市・米原市を貫流し、琵琶湖に注ぐ一級河川姉川（流域面積 369km²）とその支川高時川（流域面積 211km²）は、洪水氾濫によって相当の被害が生じる恐れのある河川と位置づけられ洪水予報河川の指定、浸水想定区域図が公表されている。

姉川、高時川は図 2.2.1 に示すように河口から 3km 付近で高時川が合流しており、上流には超過確率 100 年規模洪水調節を目的に、姉川ダムが建設されている。しかしながら、今現在の整備規模は、概ね 10 年確率規模の降雨に耐えうる河道改修が済んでいる状況である。

本研究で対象にしている地域の湖北圏域水害・土砂災害に強い地域づくり協議会は、長浜市・米原市と滋賀県、国土交通省等から構成されている。平成 19 年 11 月に発足した当時は 2 市 6 町（長浜市、米原市、虎姫町、湖北町、高月町、木之本町、余呉町、西浅井町）だったが、平成 22 年 1 月に虎姫町と長浜市が合併し、現在の 2 市のみとなった。



図 2.2.1 流域概要

2.2.2 浸水想定区域図による氾濫特性とその課題

姉川・高時川の浸水想定区域図⁷⁾は、100 年確率規模の降雨によって破堤したときの最大浸水深を示している。湖北圏域内の長浜市、虎姫町等では、洪水ハザードマップの作成し、住民に配布している。本章で対象にする長浜市虎姫地区（2010 年に長浜市と合併）は、図 2.2.2 に示すように、姉川と高時川の合流付近で二つ河川に挟まれる地域であり、地区のほとんどが浸水深 2m 以上になると推定され、5m 以上にもなる住宅地もあるため、水害時の避難計画が重要な課題となっている。

しかしながら、この浸水想定区域図の課題としては、破堤点毎の堤内地の最大浸水深を包絡させたエリアを表示したものである。これは、いわば、計画規模を最悪のシナリオとして想定した結果であり、堤内地の水害のリスクを知る上では重要な情報である。しかし、住民を安全な施設に避難させるための計画を考える際には、時系列的な変化が追えないばかりでなく、行き場のない状態から計画を立てづらいものとなっている。

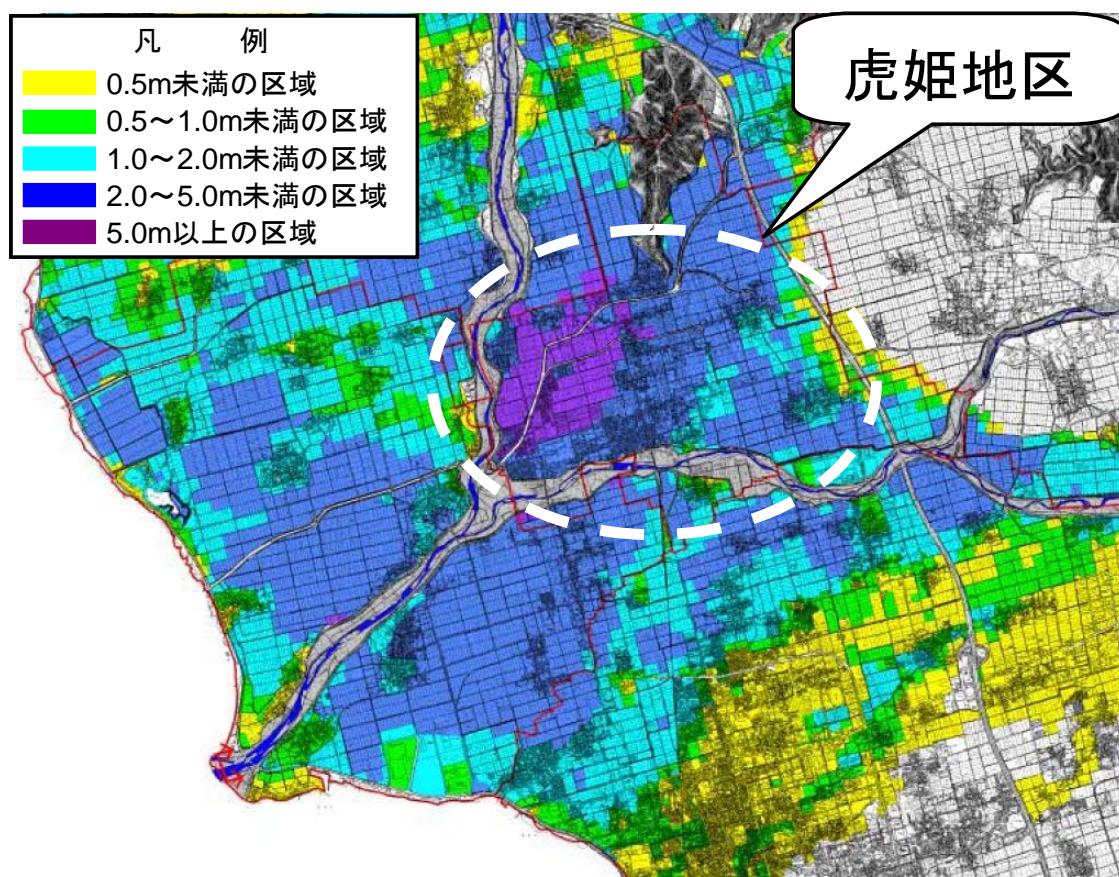


図 2.2.2 姉川高時川浸水想定区域図における虎姫地区の浸水状況

2.3 要援護者等に対する広域避難所への避難誘導・行動の課題抽出

2.3.1 破堤シナリオの設定

(1) 氾濫解析による基礎データの整備

図上訓練に利用する洪水氾濫を設定するために、浸水想定区域図⁷⁾で対象にした 100年確率規模の降雨（昭和28年9月の引き伸ばし降雨 440mm/2day）による洪水が発生したと想定して、平面二次元氾濫解析⁸⁾を実施した。破堤条件は、流下能力のない所を優先的に破堤させ、それ以外の地点では越水のみとして、計算を実施した。なお、堤内地の土地利用、盛土、水路等については、国土数値情報等を利用して計算条件を設定した。これらの全て条件は、姉川・高時川浸水想定区域図作成時の条件と同じものである。

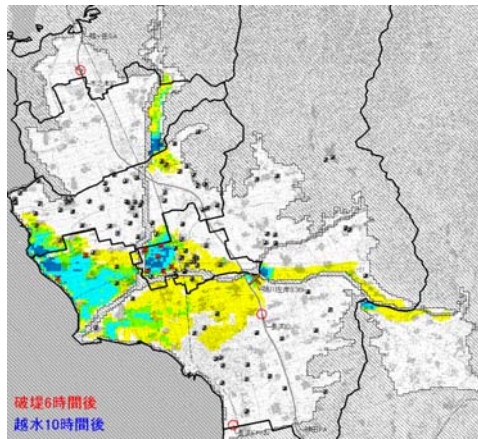
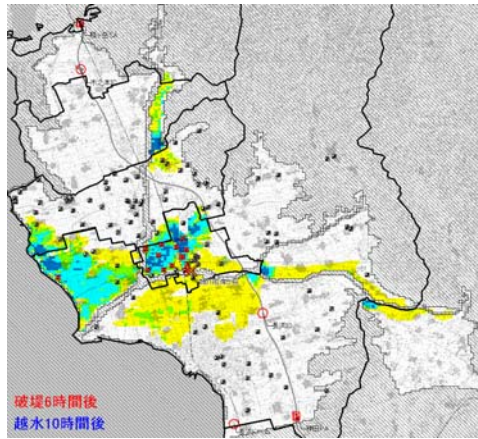
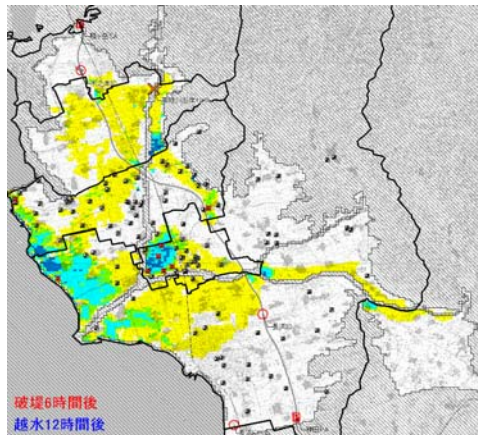
ここでは、対象とした虎姫町からの大規模な避難を想定するために、長浜市、虎姫町、湖北町、それぞれに大きな被害や要避難人口が多くなる三つのケース（三カ所の破堤点）を抽出した。その結果を、表 2.3.2に示す。これらによれば、虎姫町の浸水深が最も深くなるケースに着目したケースが、最も要避難人口が多く、後述の図上訓練の対象シナリオとして設定した。この結果から、対象したケースにおける各市町における要避難人口は、虎姫町で約4,100人、長浜市で約23,600人、および湖北町で約1,800人であった。これらの計算結果から、虎姫町の避難計画を検討するにあたり、もっとも避難人口が多いケースであるシナリオBを選定した。このケースにおける、気象概況および破堤シナリオについては、以下のように想定した。

表 2.3.1 シナリオ概況(シナリオ B)

概 況	<p>日本付近に停滞した秋雨前線が台風 14 号の影響により活発化し、10月21日深夜から断続的な集中豪雨に見舞われています。今後も大気の不安定な状態は続く見込みで、湖北地域において「非常に激しい雨」が降る状態が23日未明頃まで続く恐れがあります。</p> <p>22日昼方から夕方にかけて最大 1 時間降水量は 30 mm を超えると予想され、22日7時、彦根地方気象台より大雨・洪水注意報が発令されました。</p> <p>今後、河川のはん濫や低地への浸水等に対して、十分な警戒が必要です。</p>
シナリオ	<p>上記に示した断続的な集中豪雨により姉川・高時川が増水し、虎姫町大井地区の旧大井橋右岸の堤防が決壊するというシナリオを想定しています。</p>

図2.3.2～図2.3.4には、虎姫町の浸水過程を高時川の越水開始からの時系列を示している。これらの一連の浸水過程は、越水開始4時間後に姉川右岸で5.4km地点で破堤を想定した計算結果であり、他の破堤地点に対して最も浸水被害が大きいケースである。これによれば、JR北陸本線の盛土で氾濫水は一旦貯留されるが、盛土に設置されているカルバートから氾濫水が下流側に流出することにより、数時間後には虎姫町の中心街に浸水が拡散している。さらに、時間が経過すると、姉川・高時川の堤防で氾濫水が貯留され、浸水が深くなっていく様子がわかる。図中には指定避難所の位置を示しているが、虎姫町の指定避難所は浸水により、避難に使用できない状態になっていることが解析結果からわかった。このようなことが実際の洪水で起きれば、避難所に避難しても、一次的な対応しかとれない可能性があることを示唆している。さらに、安全な避難場所として、氾濫原から離れるか、あるいは、高層階への避難の必要性があることが条件となる。

表 2.3.2 破堤シナリオの選定

シナリオ	想定破堤地点	対象市町	破堤 6 時間後のはん濫状況	備考
(A)	姉川 8.4k 左岸 流量規模： 1/100	長浜市		<u>要避難人口</u> ※ 長浜市：約 25,600 人 虎姫町：約 3,700 人 湖北町：約 1,800 人 <u>上流水位観測所</u> 今村橋
(B)	姉川 5.4k 右岸 流量規模： 1/100	虎姫町		<u>要避難人口</u> ※ 長浜市：約 23,600 人 虎姫町：約 4,100 人 湖北町：約 1,800 人 <u>上流水位観測所</u> 国友橋
(C)	高時川 12.6k 右岸 流量規模： 1/100	湖北町		<u>要避難人口</u> ※ 長浜市：約 24,300 人 虎姫町：約 3,700 人 湖北町：約 4,700 人 <u>上流水位観測所</u> 川合橋

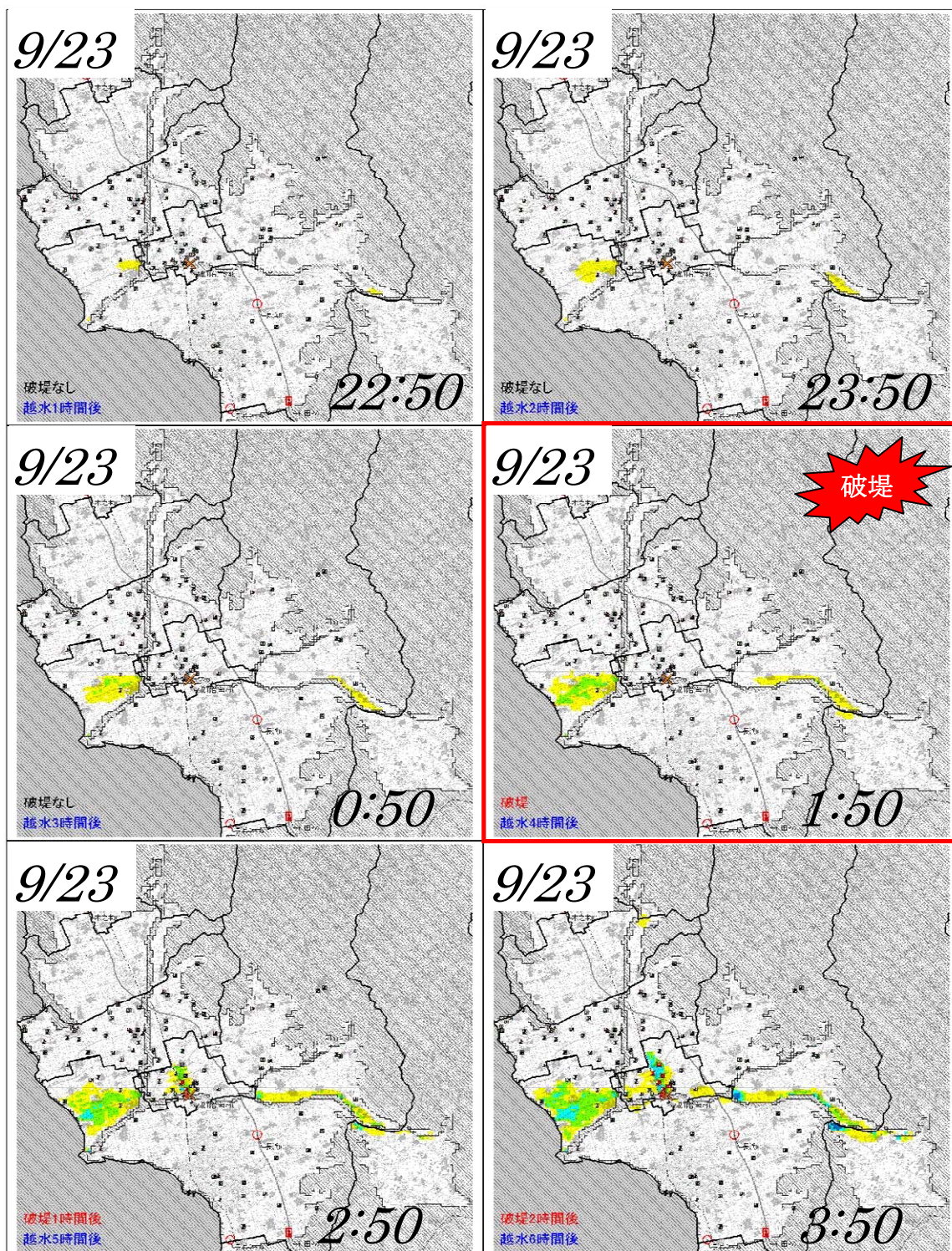


図 2.3.1 計算ケース B における姉川高時川の氾濫の時系列的変化
(越水開始から破堤 2 時間後)

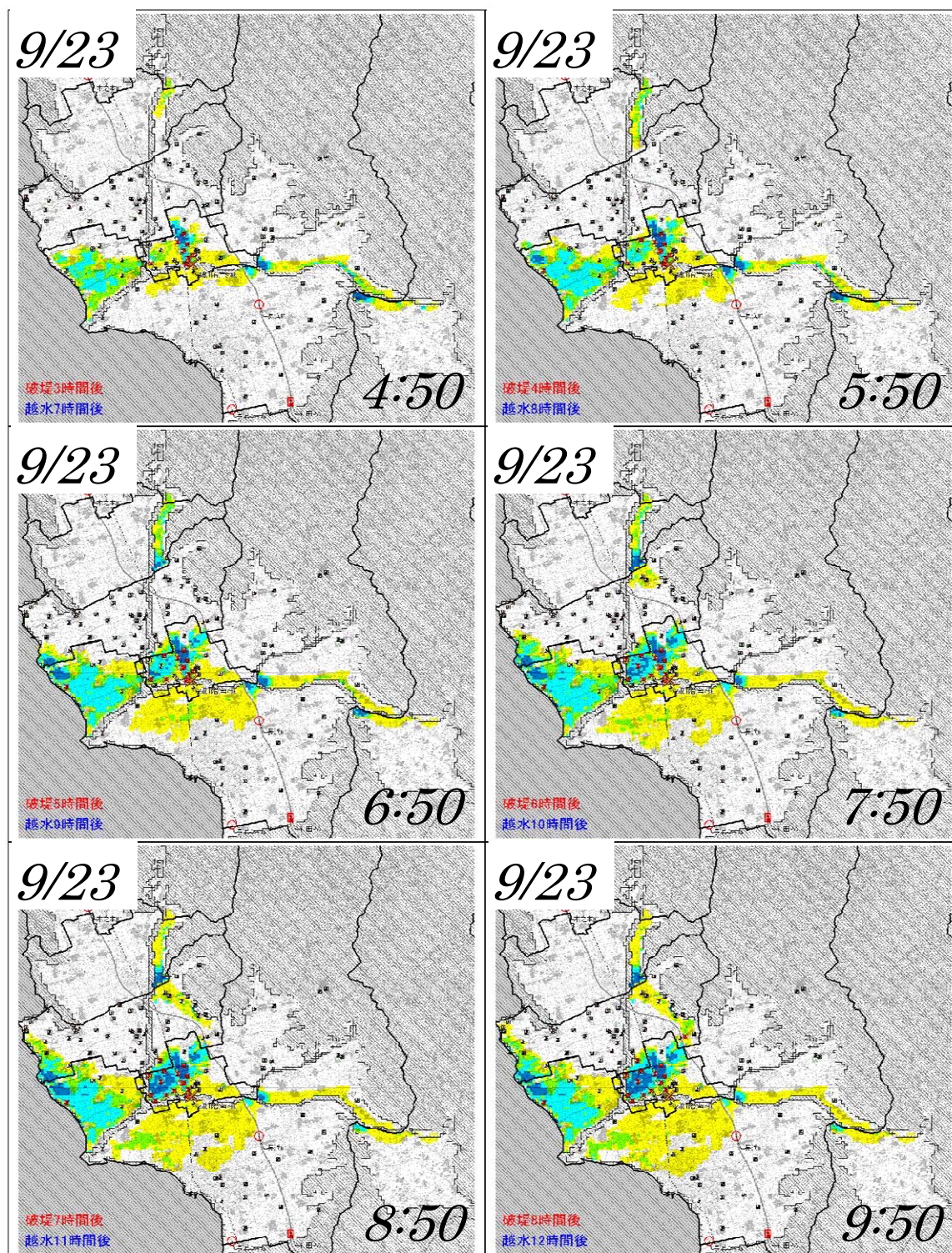


図 2.3.2 計算ケース B における姉川高時川の氾濫の時系列的変化
(破堤 3～8 時間後)

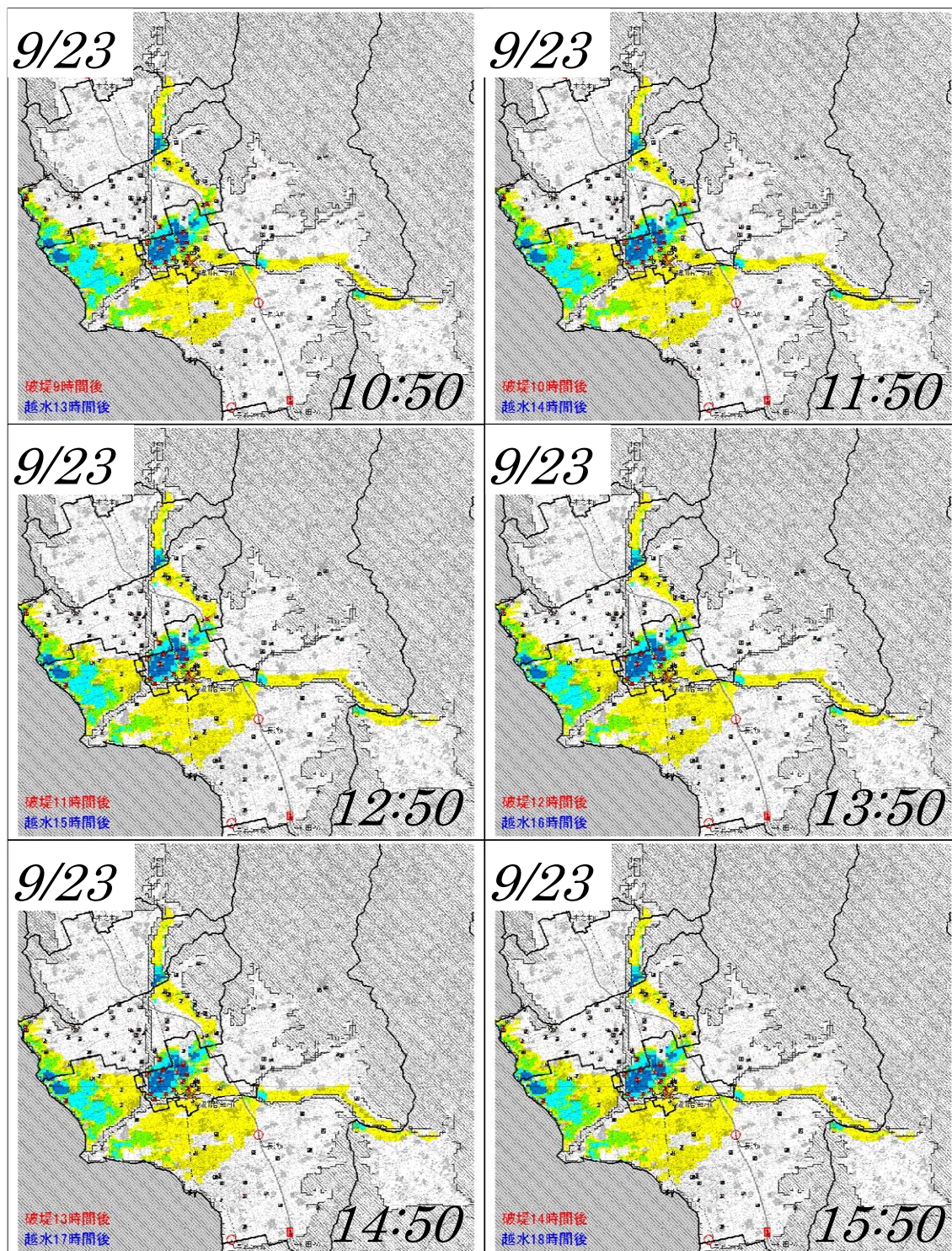


図 2.3.3 計算ケース B における姉川高時川の氾濫の時系列的変化
(破堤 9～14 時間)

(2) 想定シナリオと最終目標

想定シナリオは、姉川右岸の虎姫町大井地区の堤防が決壊・氾濫までの水位上昇を図上訓練でのシナリオの基本とし、長浜ドームまで避難することを目的にした図上訓練のシナリオを設定した。（図2.3.4および図2.3.5）。この水位上昇の過程過程に対して、表2.3.2に示すシナリオを設定し、虎姫町の住民や災害要援護者を広域避難所として指定されている長浜ドームまで安全に避難させることを図上訓練における最終目標とした。

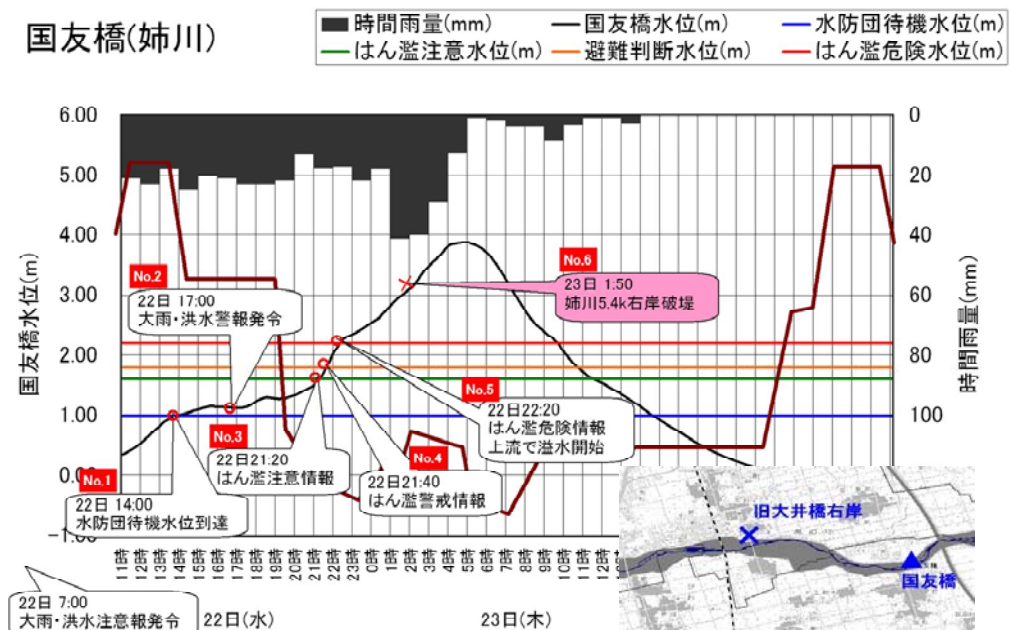


図 2.3.4 国友橋観測所で想定した水位変化



図 2.3.5 虎姫地区で設定した最終目標地点

表 2.3.2 設定した災害状況シナリオ

No.	災害状況	内容
1	大雨・洪水警報発令	今後 6 時間以内に最大 1 時間降水量は 60mm を超えると予想され、22 日 17 時現在、彦根地方気象台より大雨・洪水警報が発令されました。
2	水防団待機水位突破 (高時川 川合橋)	川合橋の水位は 22 日 22 時 10 分に水防団待機水位を突破し、さらなる上昇が予想されています。これを受け、滋賀県より水防警報(準備)が発令されました。
3	はん濫注意水位突破 (高時川 川合橋)	川合橋の水位は 22 日 22 時 50 分にはん濫注意水位を突破し、さらなる上昇が予想されています。これを受け、滋賀県と彦根地方気象台より共同で「はん濫注意情報」が発令されました。また、滋賀県より水防警報(出動)が発令されました。
4	避難判断水位突破 (高時川 川合橋)	川合橋の水位は 22 日 23 時に避難判断水位を突破し、さらなる上昇が予想されています。これを受け、滋賀県と彦根地方気象台より共同で「はん濫警戒情報」が発令されました。
5	はん濫危険水位突破 (高時川 川合橋)	川合橋の水位は 22 日 23 時 40 分にはん濫危険水位を突破し、さらなる上昇が予想されています。これを受け、滋賀県と彦根地方気象台より共同で「はん濫危険情報」が発令されました。
6	高時川富永橋上流右岸の堤防決壊	23 日 4 時 30 分、高時川の高時川富永橋上流右岸の堤防が決壊しました。湖北町では今後、はん濫および浸水による被害が拡大する事が予想されます。

2.3.2 図上訓練の概要

災害図上訓練には、国土交通省琵琶湖河川事務所、滋賀県水防本部、水防支部、災害警戒本部地方支部、長浜市、湖北町、虎姫町災害対策・水防本部、福祉担当、虎姫町2自治会、福祉法人A、Bの2団体が参加した。このうち、福祉法人Aは複数の団体から構成される協議会であり、災害時に加盟法人への支援を行う役割を担っている。一方、福祉法人Bは、身体障害者療護施設利用定員が50名、ショートステイ5名、通所10名の施設であり、医療設備を備えた総合的な施設である。

図上訓練は、図2.3.4に示す破堤地点に最も近い国友橋水位観測所の水位変化に基づき、6段階の場面（表2.3.2）を設定した。参加者は、各々が所有する災害時のマニュアルに基づきシナリオの場面毎の情報伝達や行動を1時間に対応できる否かを参加者に想定するという方法で、図上訓練を実施した。なお、この1時間の設定は図2.3.4に示す水

位変化に対する滋賀県の水防体制を予め想定したものである。この図上訓練は、住民が避難できるかどうかという問題の前に、それを誘導する立場の行政等の意志決定過程と行動をシミュレーションすることを目的として実施したものである。したがって、図上訓練の進行過程において、与えられた時間内での災害対応として巡視、情報伝達、危険周知等の業務等に要する時間を想定しながら、問題があれば、その場で付箋紙に記入してもらい、時系列的な整理を行った。

なお、図2.3.6に図上訓練における場面設定を書いた災害状況カードを、図2.3.7には、図上訓練の様子と、場面毎の各機関が直面した問題点等を書いた付箋紙の貼付状況を示している。



図 2.3.6 災害図上訓練における状況付与カード



図 2.3.7 災害図上訓練の様子(右：立場毎の時系列対応表)

2.3.3 参加者の災害対応とその考察

地方自治体、自治会、福祉団体の対応は、表2.3.3中のNo.4 氾濫警戒情報の発令あたりから本来連携した行動が必要な場面であるが、それぞれ独自の行動がマニュアルから判断されているにもかかわらず、連携がとれていない状態になった。具体的には、自治体は、住民に避難を開始してもらう段階であるのに対して、自治会では、避難所の解錠、高齢者への声かけ、そして住民全体の避難といった行動を判断しているが、自治体の人員確保などの問題に直面し、一時間という時間内にできるかどうかには確信がもてない状態になっている。同時に、福祉法人は職員招集と車での避難の可能性の検討をはじめているが、福祉法人は避難を開始していない。

さらに、氾濫危険情報の段階では、虎姫町では、協定に則り広域避難の要請とその支援を県に打診し、県から近隣市に仲介した要請しか依頼していない。長浜市も虎姫町の受け入れ要請に対する検討を開始するが、避難所の開設、それ以後の自市の状況の把握と判断で回答ができないという状況がつづいていた。虎姫町の要望である広域避難場所への移送手段の確保というニーズには応えられていないこと、虎姫町についてもその代替手段を持ち合わせていないことが明らかになった。福祉法人Aは、破堤という深刻で避難が難しくなる事態が迫っているにもかかわらず、車での避難の検討、安否確認といった作業をする必要があるが、破堤までの1時間では処理しきれないとの判断をしている。また、福祉法人Bにおいては、要援護者を避難させるために必要な生活物資の運搬・確保が必要であり、その作業に時間をとられている状況と想定していた。加えて、破堤間近になって初めて支援者の補充のための他施設への要請や要援護者の受け入れ

表 2.3.3 第1回図上訓練における各機関の対応

時間	タイミング	滋賀県		虎姫町		自治会	福祉法人	
		水防本部	水防支部	災害対策・水防支部	福祉担当		福祉法人A	福祉法人B
14:00	No.1	水防警報(準備)	虎姫町他長浜管内各市長へ「水防警報」が発令された旨をFAXにより通知する。なお、受信確認を電話で行う。	①担当課職員招集 ②情報収集・連絡体制 ③パトロール	なし	なし	①介護事務所利用者の対応 ②施設周辺の安全確認	なし
14:10		水防団待機水位	長浜建設管理部にFAX電話で着信確認					
15:00	No.2	二号体制に移行(2班体制)	大雨洪水警報が出たが、被害報告が無い状況であれば、2班待機とする。被害報告があれば部長判断により配備体制を変更	①管理職招集・全職員待機 ②防災無線で警報を広報	①管理職招集・全職員待機 ②防災無線で警報を広報	周辺の状況を確認	①職員待機。対応協議 ②情報収集	①デイ・サービスの中止判断 ②在宅の利用者へ告示連絡
15:10		大雨洪水警報	水位を監視 洪水注意報のシステム起動・気象台と電話連絡し、氾濫注意情報の発令のタイミングを相談する					
16:00	No.3	防災情報システムを監視	管内市町へFAXにて「氾濫注意情報」を送信し、受信確認を行う。	以下の対応 ①災害本部開設 ②消防団出動要請 ③社協連絡・避難所開設準備 ④職員	待機	待機	待機・情報収集	非常連絡で全職員へ防災情報の周知。 状況判断で在宅管理職員の招集指示
16:10		はん蓋注意情報	浸水が確認されれば、各土木事務所に現地確認依頼					
16:30		氾濫注意情報発令	関係機関(土木事務所・国・警察・管理者)に連絡 FAX着信電話確認・マスコミを通じて報道					
17:00	No.4	氾濫警戒情報を発令	各市町へFAXにて「氾濫警戒情報」を通知し、受信確認を行う。	①避難準備情報を広報 ②要援護者の避難開始 ③避難所受け入れ開始	区長中心に要援護者の避難を行う。	高齢者世帯、独居老人宅へ様子を見に行く。 集会所の鍵を開け、受け入れの準備をする。 鍵を開けた事を防災無線により周知する。	・民生委員と連絡(各宇清水防団と自治組織連携して、要介護者の安否確認。 地域の状況によっては、社協より避難の援助ができるか否か？	・職員の招集 ・車両で避難を検討
17:10		はん蓋警戒情報	情報収集とパトロール依頼継続					
18:00	No.5	氾濫危険情報を発令	各市町へFAXにて「氾濫危険情報」を通知し、受信確認を行う。 洪水状況パトロールを実施し、随時状況報告を行う。	①避難勧告を広報 ②県に広域避難の要請 ③住民移送準備 →県に要請		区内を巡回し、残っている家に避難を促す。	①移送先、受入先確認 ②広域避難が必要なら、福祉保険センターに避難してきた人の移送開始。 ・住民の車を利用した避難可能か？ ・町などから安否確認、市区への対応。	生活物資の運搬・確保 ・エアマット、ポータブルトイレ ・注入医療器具、移動式リフト ・オムツ
18:10		はん蓋危険情報	情報収集(パトロール依頼)報告					
19:00	No.6	災害情報を収集、各機関へ通知	市町別決壊情報を受けて、河港課等の報告し、状況把握を行う。	①避難指示を広報 ②移送開始…どこへ…?		町の指示に従い避難する。 避難した区民の把握に努める。	・避難所で ・要援護者への対応。 ・事業所利用者の状況確認	他施設(県内4施設)への人員支援の依頼。 受け入れ要請への検討
19:10		はん蓋発生情報	県職員を現地に派遣					
19:20		(堤防破堤)	氾濫発生情報					

要請を始めている。この図上訓練後の意見交換会では、このような対応状況、作業想定を踏まえると、住民、特に要援護者を長浜ドームまで避難させることはできないことが結論づけられた。

この原因としては、想定シナリオの時間的な変化に対応できていない各団体の行動マニュアルにあると考えられる。避難のための行動のマニュアルは、基本的に情報収集・伝達を基本とし、避難所の開設、要援護者への対応が記述されているが、時間軸上での対応項目の優先度などは明確になっていないことがわかった。さらに、早期の避難判断と広域避難行動を期待したシナリオだったが、自動車等の移動手段、災害時要援護者への避難支援準備と移動手段の確保が確立されていないかったために、結果として後手の対応しかとれなくなる可能性を示唆したものであった。

2.3.4 課題の抽出と解決策

図上訓練において抽出された課題と解決策は、以下の通りである。

(1) 市一福祉関係者一要援護者における情報伝達体制の整備

町一福祉関係者一要援護者の間での独自の情報伝達(経路・方法)に関する取り決めが無く、体制(各種連絡・安否確認等)が非常に曖昧であることがわかった。

この解決策として、水防法第15条⁹⁾で定められているとおり、各市は浸水想定区域内の要援護者施設への情報伝達体制の整備を早急に図ることが必要である。また、時間的な対応ができ、作業の優先順位を定めたマニュアルの整備も重要であり、場合によっては、独自の判断で行動していくことが必要になる。

(2) 避難準備情報の発令タイミング

はん濫注意情報は避難準備情報発令の目安となっているが、姉川の場合到達頻度が年2、3回と多く、その度に要援護者を動かすことになってしまう。市における現実の対応としては、水位だけでなく今後の雨の状況も勘案した判断をしており、明確な判断基準が無いことが明らかになった。

避難準備情報は、災害発生の危険が高まる前に早めの避難を呼びかけるものであり、はん濫注意水位がその目安として定められている。しかし、はん濫注意水位は水防団出動の目安として設定された経緯があり、必ずしも住民の避難を勘案したものとはなっていない。さらに、重度の障害を持つ要援護者の方にとっては動かすことの方が危険な場合もあるので、むしろ要援護者を支援する人が行動を開始するための指標として運用すれば良いとの意見があった。

これらの解決方法としては、避難準備情報の本来の意味を勘案した現実的な発令判断基準として、姉川・高時川沿いの地区毎の危険箇所における避難判断基準等を設定し、滋賀県が情報提供している河川情報との関連性を分かり易く表示・提供していくことが必要であると考えられる。

(3) 避難先の確保

湖北圏域の広域避難所として長浜ドームが指定されているが、現実的には長浜ドームへ移動する前段階として、あるいは広域避難の困難さから、近傍の安全な避難所が必要であることが明らかとなった。一方で、町指定避難所が全て浸水想定エリアとなっており、現状では近傍の安全な避難所は確保できない。また、要援護者に関しては共通受入先について隣接市と協議・調整する必要がある、特に重度障害者対象の設備の整った避難先も決めておく必要があると考えられる。

既に、この圏域においては、平成20年12月12日に「湖北圏域における広域避難の連携に関する基本協定書」¹⁰⁾が締結されている。避難所の相互援助に関する事項が定められているが、今後は協定の細部運用に向けた具体的事項について県・市町間で段階的に協議・検討することが必要と考えられる。

要援護者の生活保障・生活支援には一定のハード設備が必要であり、生活物資も必要になる（障害者・高齢者向けトイレ設備・ポータブルトイレ、介護ベッド、医療器具、オムツのストック、ミキサー食の対応、経管栄養剤のストック等）。これを踏まえた湖北圏域の福祉施設、病院、民間施設等の「福祉避難所」指定について、県市と福祉関係者が連携して協議・検討することが必要と考えられる。

(4) 避難手段の確保

広域避難所として指定されている「長浜ドーム」まで避難させるには、徒歩での避難は困難であり、自動車を使った避難は不可欠であり、その可能性について検討することが必要と考えられる。

要援護者の移送にあたっては、民間バスや福祉バスを利用することが望ましいが、現在そのような協定は締結されていない。要援護者の滋賀県もしくは各市と民間バスの間で民間バス会社との応援協定や福祉バスの相互利用協定といった「発災前に機能する応援協定」を締結し、有事に円滑に利用できるようにした方が望ましい。また、各市が所有する福祉バスの相互利用についても協定を締結し、円滑に利用できるようにしておくことも必要と考えられる。さらに、重度障害者は全員が車いす又はストレッチャー対応なため、リフト付き車両等での避難手段が必要になることが参加者から指摘された。

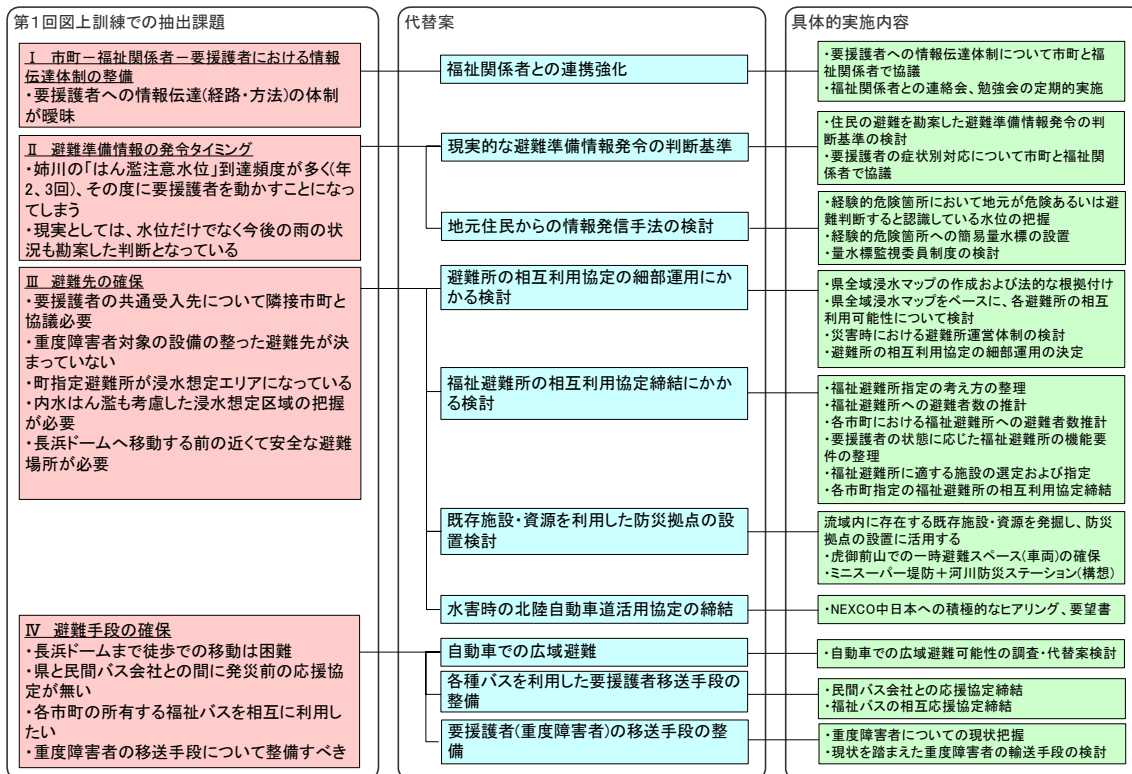


図 2.3.8 第1回の災害図上訓練での課題抽出と具体的な実施内容

2.4 第一回の反省を踏まえた要援護者施設の避難行動

2.4.1 第一回図上訓練との相違点

第一回の図上訓練では、姉川・高時川の外水氾濫に伴う虎姫町から長浜ドーム等へ避難する際の課題と解決策を検討した。第二回の図上訓練では、現実的な避難の手順として、町内の指定避難所へ一時的に避難し、そこから広域避難所である長浜ドームをはじめ町外の避難施設へ避難させることを最終目標とした。

この周辺の氾濫現象としては内水河川の氾濫が先に発生していることが氾濫解析から明らかになり、第二回の図上訓練においては内水氾濫も想定した避難時の課題抽出とその解決策を考察することを目的とした。ここでの内水氾濫は、法的な情報発信の義務的な河川の氾濫であり、それ以後に発生する姉川・高時川の氾濫が混在することが本来の氾濫現象であると考えられた。また、氾濫現象に加えて、平成22年1月に虎姫町が長浜市と合併することも視野にいれ、長浜ドームにとらわれない町外の避難所に避難できることを図上訓練のルールとした。

2.4.2 氾濫シナリオの設定

第二回で設定した外力は、滋賀県の推進する流域治水対策で設定されている降雨波形(中央集中型)を用い、100年確率規模の降雨量を想定して、内水氾濫を想定した平面

二次元氾濫解析⁸⁾¹¹⁾を実施した。計算結果は、虎姫町を貫流する田川や用水路の氾濫が、姉川・高時川の越水、破堤による氾濫よりも先に発生する。図2.4.1には、内水氾濫を考慮した解析の違いを示している。なお、姉川・高時川の破堤点の設定は、第一回では一カ所であったが、このケースでは、越水する地点は全て破堤するというケースを想定した。

図上訓練は、このような氾濫を引き起こすケースにおいて、図2.4.2に示す洪水予報基準水位観測所である難波橋水位観測所の水位の時系列変化を基に、表2.4.1に示す7つの場面を設定した。なお、洪水規模は、同じ確率規模であるが、降雨波形とそれに伴う内水氾濫と姉川・高時川の氾濫のタイミングや拡散状況が異なることから、これらの数値解析の結果を踏まえた災害状況を設定した。

表 2.4.1 災害状況別の内容

No.	災害状況	内 容
1	水防団待機水位突破 (姉川 錦織橋)	姉川・高時川上流部の山間部での断続的な降雨の影響で、錦織橋の水位は30日4時に水防団待機水位を突破し、さらなる上昇が予想されています。これを受け、滋賀県より水防警報(準備)が発令されました。
2	大雨・洪水警報発令	今後6時間以内に湖北圏域の最大1時間降水量は60mmを超えると予想され、30日6時現在、彦根地方气象台より大雨・洪水警報が発令されました。虎姫町域でも雨足が強くなり始めました。
3	はん濫注意水位突破 (姉川 錦織橋)	錦織橋の水位は30日11時にははん濫注意水位を突破し、さらなる上昇が予想されています。これを受け、滋賀県と彦根地方气象台より共同で「はん濫注意情報」が発令されました。また、滋賀県より水防警報(出動)が発令されました。さらに、住民より一部地区で内水による浸水が発生しているとの通報がありました。
4	避難判断水位突破 (姉川 錦織橋)	錦織橋の水位は30日14時に避難判断水位を突破し、さらなる上昇が予想されています。これを受け、滋賀県と彦根地方气象台より共同で「はん濫警戒情報」が発令されました。また、各地で内水による浸水が発生しております。
5	はん濫注意水位突破 (田川 月ヶ瀬橋)	滋賀県より、月ヶ瀬橋(田川)の水位が30日15時にははん濫注意水位を突破し、さらなる上昇が予想されることが発表されました。今後、田川のはん濫による浸水の拡がり懸念されております。
6	はん濫危険水位突破 (姉川 錦織橋)	錦織橋の水位は30日17時にははん濫危険水位を突破し、さらなる上昇が予想されています。これを受け、滋賀県と彦根地方气象台より共同で「はん濫危険情報」が発令されました。さらに、彦根气象台から虎姫町を対象に「記録的短時間大雨情報」も同時に発令されました。
7	高時川の錦織橋上流の右岸堤防決壊	30日23時、高時川の錦織橋上流の右岸の堤防が越水により決壊し、滋賀県と彦根地方气象台より共同で「はん濫発生情報」が発令されました。今後、はん濫および浸水による被害が拡大する事が予想されます。また、国友橋(姉川)の水位もはん濫危険水位を大きく上回り、破堤の恐れが高まっております。

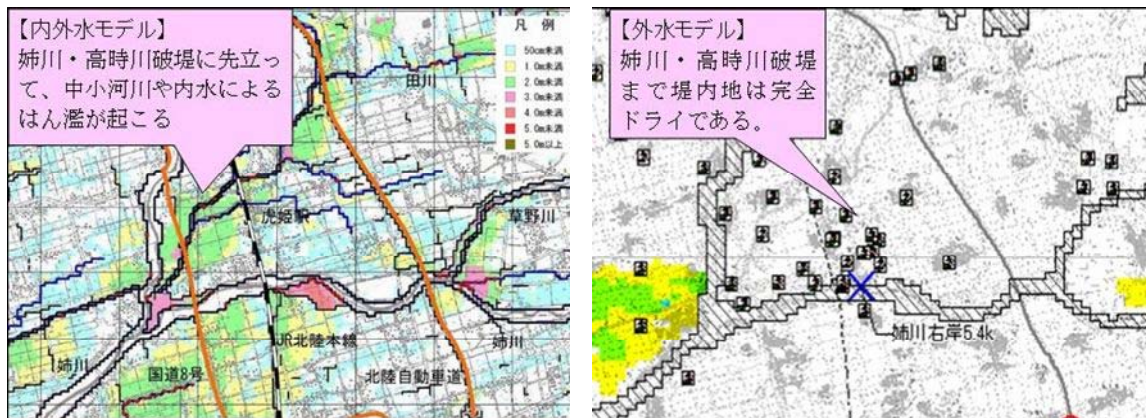


図 2.4.1 内外水を考慮した氾濫解析結果と外水だけの氾濫解析結果の違い

2.4.3 図上訓練の概要

図上訓練の手順は第一回と同じであり、表2.4.1に示す各段階における参加者の防災体制とその課題を抽出した。また、滋賀県水防本部、水防支部、災害警戒本部地方支部、長浜市、湖北町、虎姫町災害対策・水防本部、福祉担当、虎姫町2自治会、福祉法人3団体、NEXCO中日本（株）に加えて琵琶湖河川事務所が参加した。それぞれの立場と保有するマニュアルを参考に、図2.4.2に示す水位の立ち上がりに対する各機関の対応やそれに伴う課題を整理した。なお、虎姫町が避難路として北陸自動車道を利用したい

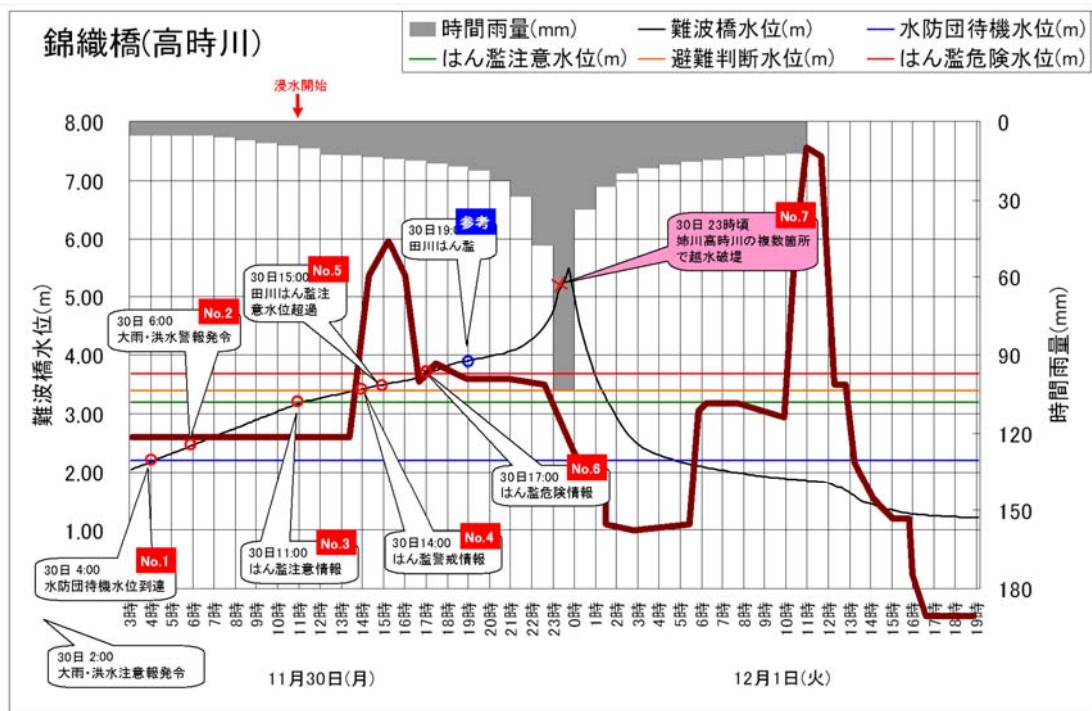


図 2.4.2 洪水予報基準水位観測所で設定した水位

という要望があったため、NEXCO中日本（株）が参加した。

災害図上訓練では、時系列に沿って、気象情報発令や河川情報発令等の重要となる時点における状況を記載した「災害状況カード」を参加者全員に配布し、各々の立場での対応あるいは問題点について検討した。なお、ここで用いた災害状況カードを図2.4.3に示す通りで、場面毎に状況説明、平面的な氾濫状況、各水位観測所の水位の状況を示したものである。

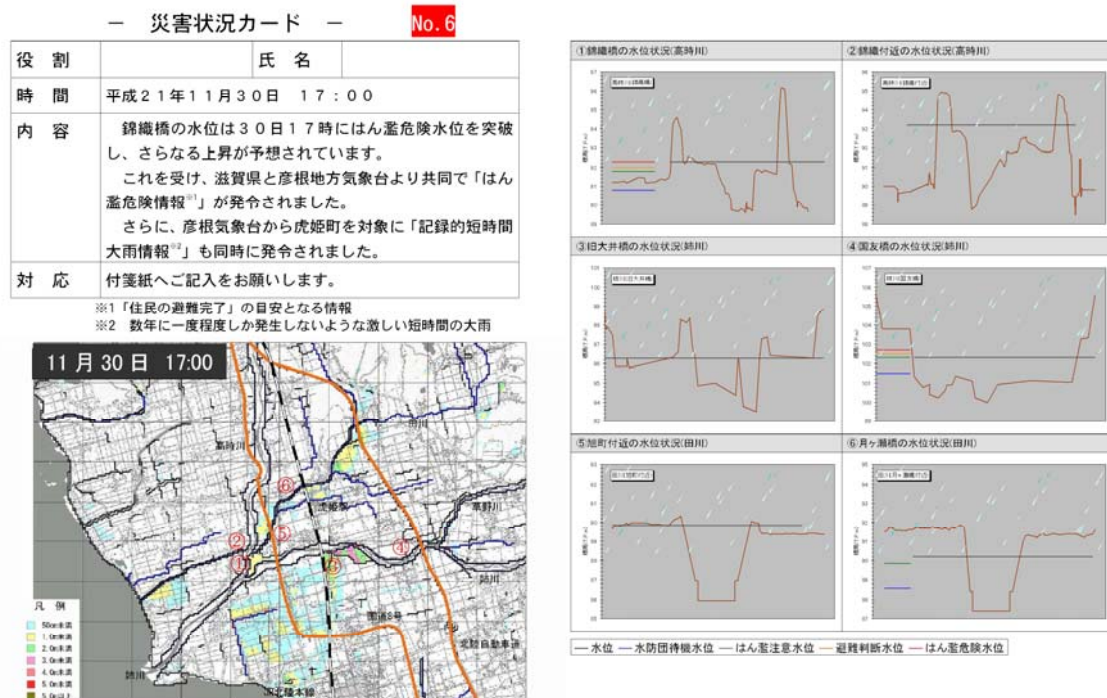


図 2.4.3 第2回災害図上訓練の災害付与カードの例
 (上段: No.4 氾濫警戒情報発令時, 下段: No.7 高時川破堤時)



図 2.4.4 災害図上訓練の様子
(ホワイトボード上にマグネットとマジックを用いた図上訓練)

2.4.4 立場毎の対応結果

第二回では、社会福祉団体が避難行動に対する基本的な考え方とシナリオに対する判断に大きな変化があった。表2.4.2には、垂直避難を前提とした情報収集と行動について示されている。この背景として、社会福祉団体は避難の準備、情報収集・伝達で避難する時間の不足、行政からの情報待ちなどの要因のために、避難することが図上訓練で実現できなかった。これに鑑み、第二回の図上訓練の前に、独自に避難判断のためのフローと施設での対応について議論され、第二回での訓練において実践してみたという経緯があった。社会福祉団体は、広域避難所への水平避難を前提として考えられてきたが、姉川・高時川の水位上昇の速さ、情報伝達等の時間的な意志決定と行動の問題から、二階以上に避難することを自ら取り決め、この図上訓練に望んでいる。これにより、生活物資の運搬等の行動、要援護者の介護度の違いによる優先度の決定、そして垂直避難の実施という、スムーズな避難活動が第二回の図上訓練で披露された。第一回との違いは、第一回では避難することそのものに執着していたことに対して、第二回では情報共有の徹底、生活物資・医療器具の集約と二階への運搬後に避難を開始するという手順であった。これにより、避難後の対応も可能となり、要援護者を段階的に2階以上に避難させ、もし広域的に避難する場合の介護度などの優先度をつけることにより、救助順位や救助隊への情報共有ができ、スムーズに輸送できる体制を執っていることである。これは、今後の高齢者を含む福祉団体の避難のあり方について大きな方向性（発想の転換）を示したものと考えられる。

表2.4.2 第二回での福祉団体の垂直避難過程

状況	滋賀県 水防支部	虎姫町	福祉団体 A 団体	福祉団体 B 団体
No.1 水防団 待機水位超過	<ul style="list-style-type: none"> 本部からのFAX情報を確認し、関係市町機関へ水防警報情報を伝達確認する 	<ul style="list-style-type: none"> 役場水防班の召集 現場パトロール(河川) 情報収集(雨量・流量等) 	<ul style="list-style-type: none"> 情報により避難準備をする 今後の情報を注意する 河川の水位を見に行く 	<ul style="list-style-type: none"> 情報収集に努める 田川の水位を現地確認する
No.2 大雨洪水警報 発令	<ul style="list-style-type: none"> 水防本部からのFAX情報を確認し、第2配備体制に入る 関係市町へ情報を伝達・確認する 	<ul style="list-style-type: none"> 全職員の召集 町内のゲート操作 町内パトロール 各字区長に注意の連絡 	<ul style="list-style-type: none"> 情報を注意深く取る 事業中止する 	<ul style="list-style-type: none"> 通所事業(デイサービス)の休止を決定し、利用者宅に連絡 ※平日の場合 状況によって課長職レベルで対応を協議する(情報の共有化)
No.3 はん濫 注意水位超過	<ul style="list-style-type: none"> 本部からの水防情報「氾濫注意情報」を確認し、関係機関に情報伝達、確認を行う 	<ul style="list-style-type: none"> 氾濫箇所の対応 消防団への出動依頼(地元消防班、幹部) 浸水地先区長に自主避難、要援護者支援要請 防災無線で住民へ避難準備の情報伝達 役場水防班と消防団出動、水防活動 避難所開設準備 	<ul style="list-style-type: none"> 利用者を待機させて対応を協議する 	<ul style="list-style-type: none"> 必要な医療器具を一箇所に集める
No.4 避難判断水位 超過	<ul style="list-style-type: none"> 本部からの「氾濫警戒情報」を関係機関へ伝達、確認する 道路冠水箇所について、通行止措置をとる 市町へ連絡する 	<ul style="list-style-type: none"> 長浜市に避難所の受け入れを要請(神照小) 南大井住民の避難誘導 町内全域に避難勧告 避難所の開設 災対本部設置 	<ul style="list-style-type: none"> 基本は待機 協議対応 	<ul style="list-style-type: none"> 入所者を全員、2階に移動 非常食も同じく 医療機器も同じく
No.5 はん濫 注意水位超過 (田川)		<ul style="list-style-type: none"> 町内に避難指示 広域避難の県へ要請(ドーム) 		<ul style="list-style-type: none"> 入所者のランク分けによるグループ別編成(自律度の高い人、医療ニーズの高い人、その他)
No.6 はん濫 危険水位超過	<ul style="list-style-type: none"> 本部からの「氾濫危険情報」を関係機関に伝達、確認する 道路パトロール情報に基づき道路の通行止めを進める 関係市町へ連絡する 	<ul style="list-style-type: none"> 防災無線で2階避難して外出しないように呼びかけ 県に災害支援要請 	<ul style="list-style-type: none"> 待機する 行政との連絡 職員待機対応 	
No.7 はん濫発生 (高時川)	<ul style="list-style-type: none"> 本部よりの「氾濫発生情報」を関係機関に伝達、確認する 道路の通行止を可能な限り進める 関係市町に連絡する 	<ul style="list-style-type: none"> 避難者の対応 避難所の安全確保と運営 被害状況の報告 安否確認、情報収集と提供 	<ul style="list-style-type: none"> 情報収集 職員間協議対応 	<ul style="list-style-type: none"> 生活物資の確保 マンパワーの確保

2.4.5 広域避難計画

図上訓練を踏まえ、滋賀県全域浸水マップのシナリオに対する広域避難計画の基本的考え方として、以下に示す対応が考えられる。この基本的考え方をベースに、ひとつの広域避難計画(案)について検討した結果を表 2.4.3 に示す。

【広域避難計画の基本的考え方】

- ① 内水による浸水は J R 北陸本線より西側地域より生じることに留意し、まずは当該地域に居住の住民が、役場や小学校などの指定避難所へ一次避難する。
 - ② 姉川・高時川本川の水位も上昇し、洪水予報(はん濫注意情報レベル)が発令された段階で、避難対象エリアの住民は避難準備を行う。
 - ③ 姉川・高時川本川の水位がさらに上昇し、洪水予報(はん濫警戒情報レベル)が発令された段階で、避難対象エリアの住民は、浸水深の比較的浅い町東部や北部、あるいは北陸自動車道より長浜ドームへ避難する。
- (既に指定避難所へ一次避難している住民についても同様である…二次避難)

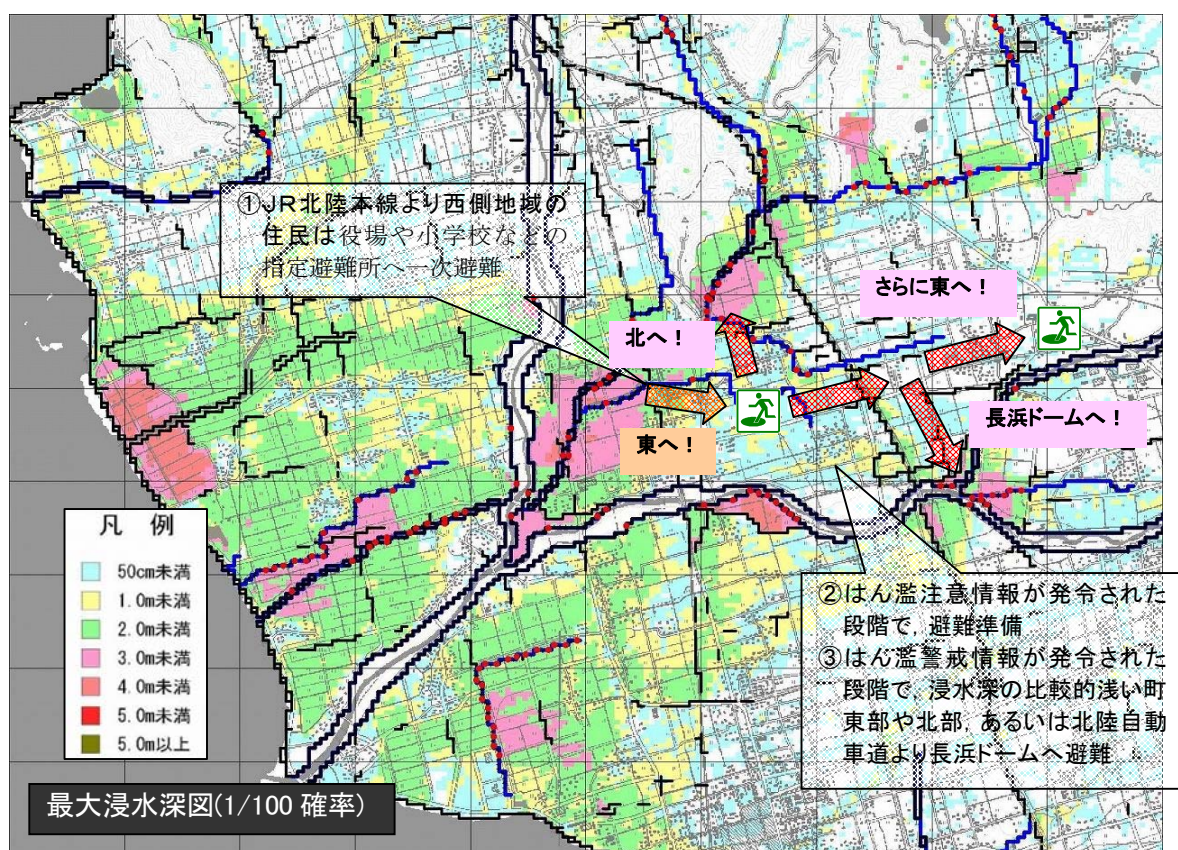


図 2.4.5 広域避難計画の基本的考え方

表 2.4.3 災害図上訓練を踏まえた広域避難計画の作成

No.	災害状況(国・県からの情報)	県からの情報	その他情報	行政(虎雄町)	住民対応(J R 北陸線以西に居住)	住民対応(J R 北陸線以东に居住)
1 2			<ul style="list-style-type: none"> 大雨洪水警報発令 水防団待機水位突破 	<ul style="list-style-type: none"> 町内パトロール強化(内水河川の状態、本川危険箇所)の状況 水防団出動命令 避難準備情報発令(J R 以西) 各学区長に警戒の連絡、特に J R 以西の区長には要援護者支援要請 避難所開設準備(一次避難所) 	<ul style="list-style-type: none"> 一次避難所への避難準備 また、要援護者の避難支援者は支援行動を開始 内水河川(山川)の状況把握 	<ul style="list-style-type: none"> 情報収集
3		<ul style="list-style-type: none"> はん氾注意情報 (はん氾注意水位突破) 	<ul style="list-style-type: none"> 住民により一部地域で内水はん氾の通報りとの通報 	<ul style="list-style-type: none"> 水防団出動命令 避難勧告発令(J R 以西) 避難準備情報発令(J R 以东) 避難所開設(一次避難所) 避難所開設準備(二次避難所) 	<ul style="list-style-type: none"> 一次避難所への避難開始 (健康者、要援護者+避難支援者) 重度障害者施設については必要な医療器具、非常食等をひとつにまとめる(湖北タウンホーム) 	<ul style="list-style-type: none"> 避難所への避難準備 また、要援護者の避難支援者は支援行動を開始
4 5		<ul style="list-style-type: none"> はん氾警報情報 (避難判断所水位突破) 	<ul style="list-style-type: none"> 内水はん氾拡大 	<ul style="list-style-type: none"> 水防団活動命令 避難指示発令(J R 以西) 避難勧告発令(J R 以东) 避難所開設(二次避難所) 	<ul style="list-style-type: none"> 二次避難所への避難開始 (健康者、要援護者+避難支援者) 重度障害者施設については入所者全員を建物 2 階へ移動(湖北タウンホーム) 	<ul style="list-style-type: none"> 二次避難所への避難開始 (健康者、要援護者+避難支援者)
6		<ul style="list-style-type: none"> はん氾危険情報 (はん氾危険水位突破) 	<ul style="list-style-type: none"> 内水はん氾拡大 	<ul style="list-style-type: none"> 県に災害支援要請 避難指示発令(J R 以东) J R 以西の住民のうち、逃げ遅れた方に対して自宅 2 階待機を呼びかける 	<ul style="list-style-type: none"> 二次避難所への避難完了 重度障害者施設については建物 2 階で待機、行政に支援を要請 	<ul style="list-style-type: none"> 二次避難所への避難完了

2.5 避難計画策定に向けた課題と解決策の体系化

2.5.1 要援護者に対する避難支援体制

第二回の図上訓練の結果から要援護者施設の避難方法が二階以上に上がること（垂直避難）に切り替わったことで、以下に示す新たな課題が抽出された。

a) 防災部局一福祉・保健衛生部局の連携強化

要援護者の支援を考える上で、防災部局一福祉・保健衛生部局との間での横断的連携が不可欠であるが、連携できていないのが現状である。湖北圏域においては、福祉部局との有機的な情報交換や情報共有を図りやすい環境を考えていく必要がある。

b) 福祉事業者間の連携活用

福祉事業者間の連携の活用により、有事における物的資源（リフト付き車両等）および人的資源（専門技術者）の確保が可能な体制を構築することが必要である。

c) ふくし避難所の指定

要援護者の生活保障・生活支援には一定のハード設備が必要であり、生活物資も必要になる（障害者・高齢者向けトイレ設備・ポータブルトイレ、介護ベッド、医療器具、オムツのストック、ミキサー食の対応、経管栄養剤のストック等）。長浜市では「ふくし避難所」の指定¹²⁾について県内でも先進的に取り組んでいるので、今後は合併後の市全体に指定を拡げていくことが考えられる。

d) 要援護者の把握

長浜市では「手挙げ方式」¹²⁾にて市内の要援護者の把握を実施している。個人情報保護の関係から、情報を各自治会に還元することは不可能である。したがって、今後は自治会としても独自に要援護者の把握をすることが必要であると考えられる。

e) 法的な情報提供のない内水河川の氾濫と避難行動への対応

姉川・高時川の河川情報、氾濫危険情報については、関係機関に周知される一方で、田川等の中小河川といった法的な情報(洪水予報、避難勧告等)の周知の義務がない場合、行政側としては情報周知のトリガーが存在しない。このような氾濫の危険性のある河川の周辺状況は、住民や福祉団体等にとって、災害発生前から脅威である。このような河川の周辺の住民や福祉団体などは自ら避難や洪水の危険性を判断するためにも行政にどのような情報が必要か求めていくことが必要である。一方で、行政側においても内水氾濫が避難に支障をきたす、あるいは避難時に危険であると判断されるのであれば、住民や福祉団体等に避難を促進するためにも内水河川の監視を強化し、その情報を提供していく努力が必要である。

さらに、河川情報を基本とした、各集落、各団体の行動計画を検討することが必要(自

治会別マニュアル作り等)である。特に、災害時要援護者が多くいる地区、避難所への移動は困難な地区は、2階に避難するあるいは近くて安全な地区や建物まで移動し、2階以上に避難するなど明確な姿勢を示すことは重要である。これにより、救助対象が明確となり、自衛隊などによる救助活動がしやすくなる。

2.5.2 広域避難の対応策

第2回の災害図上訓練では、断続的な集中豪雨により湖北管内の各地区において内水はん濫が発生し、さらには姉川・高時川の増水に伴って、一部堤防から越水するというシナリオを想定した。このようなシナリオの中で、市町内の住民を指定避難所あるいは広域避難所として指定されている長浜ドームまで安全に避難させることを最終目標とした。災害図上訓練において抽出された課題を第1回と合わせて、以下の5つの項目に対して検討した結果を以下のように示す。

- I 要援護者に対する避難支援体制の未整備
- II 避難情報の発令タイミング・エリア
- III 情報の受け手側(住民)の対応
- IV 避難時における安全性の確保(避難先・避難経路・避難手段)
- V 法的な情報発信の無い河川への対応

(1) 要援護者に対する避難支援体制の未整備

避難を前提とした場合の要援護者に対する支援体制の整備状況が悪いとの指摘があった。具体的には、防災部局－福祉・保健衛生部局の連携不十分に始まり、要援護者の避難所移送にかかる人手の不足、要援護者のための避難所の環境未整備、避難支援プランの未整備等といった「要援護者に対する避難支援体制の未整備」が課題として挙げられる。

- ・避難のための移動手段・マンパワーの確保が最大の課題
- ・在宅の難病患者への対応
- ・避難所における要援護者の生活環境整備
- ・「ふくし避難所指定」の協定書
- ・要援護者の情報収集や共有化の仕組み作り
- ・防災部局と福祉部局の横断的な連携
- ・デイサービスの利用者の対応
- ・訪問すべき在宅の利用者の対応
- ・避難してきた人の受け入れの対応
- ・地域の要援護者への対応
- ・災害発生後における復旧、復興の役割分担
- ・要援護者への情報伝達経路・方法について連絡体制があいまい

(2) 避難情報の発令タイミング・エリア

第 1 回の図上訓練時点では避難情報の発令タイミングそのものが課題となっていたが、その後、各市町とも洪水予報発令のタイミングに合わせて発令することで決定している。第 2 回の図上訓練では、地区毎に危険度の偏りがあることから、きめ細かい発令タイミング・エリアの設定といった課題が挙げられる。これらの具体的な課題は、以下の通りである。

- ・姉川の場合到達頻度が年 2, 3 回と多く、その度に要援護者を動かすことになる。
- ・現実の対応としては、水位だけでなく今後の雨の状況も勘案した判断をしている。
- ・発令するタイミングは決まっているが、地区毎の危険度に偏りがある。

(3) 情報の受け手側(住民)の対応

今回訓練に初めて参加した情報の受け手である住民は、行政から情報が発信された場合にどのような対応を執るべきか分からない様子であった。例えば、いざ避難勧告等行政より情報が発信されても、住民としてどのような行動をとったら良いか分からないことや、住民側から情報を入手したい場合、どのような手順で何処へ問い合わせたら良いか分からないといった情報伝達と行動が十分に啓発されていないものと考えられる。すなわち、行政から洪水予報や避難勧告等の情報が発令されても受け手である住民側の体制が整っておらず、対応できないといった「情報の受け手側(住民)の対応」が課題として挙げられる。

(4) 避難時における安全性の確保(避難先・避難経路・避難手段)

今回シナリオでは、姉川・高時川が破堤する前に堤内地の各地区で内水はん濫が発生することを想定した。この想定においては、道路冠水等による通行不能箇所の把握・対応、安全な避難用道路の指定・整備等といった「避難経路上の課題」が挙げられた。

また、湖北圏域の広域避難所として長浜ドームが指定されている¹³⁾が、現実的には長浜ドームへ移動する前段階として、近傍の安全な避難所が必要であるという「避難先の課題」、広域避難所として指定されている「長浜ドーム」まで徒歩で避難するのは困難であるという「避難手段の課題」も挙げられた。そこで、より地域に根付いた避難計画を考える上で、広域的な避難を含めた場合、以下の課題について議論する必要がある。

- ・町内や町外への避難経路の指定されていない。
- ・安全な避難経路の住民周知されていない。
- ・JR 北陸線下のアンダーパス付近が浸水し、通行の際危険である。
- ・町指定避難所が浸水想定エリアとなっている。
- ・長浜ドームへ移動する前に、近くで安全な避難場所が必要である。
- ・長浜ドームまで徒歩での移動は困難である。
- ・県と民間バス会社との間に発災前の応援協定が無い。

- ・各市町の所有する福祉バスを相互に利用したい。

(5) 法的な情報発信の無い河川への対応

第2回のシナリオでは、田川等の中小河川を対象とした法的な情報(洪水予報、避難勧告等)が行政から発令されることがなかったため、行政側としては情報周知のトリガーが存在しないことに課題が残った。

また、住民側で内水実績情報を行政に伝えたい場合、どのような手順で何処へ通報すれば良いか分からない状況であった。したがって、内水河川等の「法的な情報発信をしていない河川に対する対応」が課題として挙げられる。

2.5.3 課題と解決策の体系化

災害図上訓練において抽出された各々の課題に対する解決案および実施主体について、図2.5.5のように整理した。

(1)要援護者に対する避難支援体制の未整備

1)防災部局－福祉・保健衛生部局の連携強化【行政】

要援護者の支援を考える上で、防災部局－福祉・保健衛生部局との間での横断的連携が不可欠であるが、連携できていないのが現状である。湖北圏域においては、まずは本ネックを解消すべく、本協議会に福祉部局の参画を促し、有機的な情報交換や情報共有を図りやすい環境を構築する。

2)福祉事業者間の連携活用【住民】

福祉事業者間の連携の活用により、有事における物的資源（リフト付き車両等）および人的資源（専門技術者）の確保が可能な体制を構築する。

3)ふくし避難所の指定【行政】

要援護者の生活保障・生活支援には一定のハード設備が必要であり、生活物資も必要になる（障害者・高齢者向けトイレ設備・ポータブルトイレ、介護ベッド、医療器具、オムツのストック、ミキサー食の対応、経管栄養剤のストック等）。長浜市では「ふくし避難所」の指定について県内でも先進的に取り組んでいるので、今後は合併後の市全体に指定を拡げていくことで対応する。

4)要援護者の把握【住民】

現在長浜市では“手挙げ方式”¹¹⁾にて市内の要援護者の把握に努めているが、個人情報保護の関係から、情報を各自治会に還元することは不可能である。よって、今後は自治会としても独自に要援護者の把握をする努力をしていくことで対応する。

(3)情報の受け手側(住民)の対応

1)地区別避難計画の策定【住民・行政（支援）】

行政から情報が発信された場合に住民がどのような対応を執るべきかを地域で取り決めていく必要がある。加えて、地域固有の災害文化を調査するとともに、地域全体で最新の氾濫シミュレーション等の結果も援用しながら、図2.5.2に示すように、地域防災力向上に資する取り組みとして、地区単位(集落単位)での洪水を対象とした地区別避難計画を策定する必要があると考えられる。さらに、策定された地区別避難計画については、行政側と情報共有を行い、地区別ワークショップという形式にて住民間で様々な意見を交わすとともに、条文化やマップなどにして共通認識を深めていくことが必要であると考えられる。

【地区別防災ワークショップの実施内容(案)】

地区別防災ワークショップの実施内容(案)

住民主導型の洪水時における緊急避難体制の確立を目指して、地元住民が昔から経験的に把握している災害下位文化という視点での地区別防災ワークショップを実施します。

ワークショップでは、住民の方々に以下の6つのポイントを理解して頂きながら、最終的には自主避難体制の確立を目指します。

※災害下位文化

過去の被災経験や、経験・知識を元にした教訓等、人の知識や経験に関わる情報

①洪水災害・防災対応に対する理解を深める

①相手を知り、己を知る

洪水災害に対する深い現象理解を促すとともに、いざ危険な状況になったとしてもなかなか避難することができない人間の心理特性を知ってもらう。

②ハード施設に対する過剰な依存心の解消

ハード施設には必ず想定規模があり、その想定で規模上の洪水が発生した場合には、ハード施設だけの対策には限界があることを理解してもらう。

③行政からの情報に対する過剰な依存心の解消

行政からの情報に頼りきりではなく、行政からの避難勧告を待たずに自分たちで避難準備あるいは避難行動することが必要であることを理解してもらう。

④自助・共助の必要性の認識

災害対応は「自助」が基本であり、自分一人で避難することが困難な方(災害時要援護者)には「共助」が必要であることを理解してもらう。

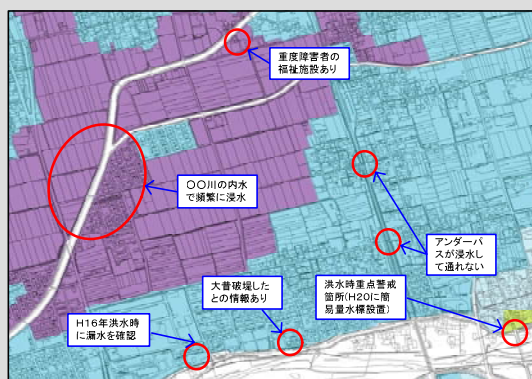
⑤地区別防災マップを作成する

⑤住民の知識の共有化

住民の方々がそれぞれ持っている地域の洪水災害に関する知恵(過去の経験、伝承等)を元に「地区別防災マップ」を作成し、地域における知識の共有化を図る。



㊦ 地区別防災ワークショップのイメージ



㊦ 地区別防災マップの作成イメージ

⑥地区別避難マニュアルを作成する

⑥住民による自主避難体制の確立

地区別防災マップに記載した情報を元に、洪水発生時における住民の自主避難体制について協議し、地区別避難マニュアルとしてとりまとめる。

図 2.5.2 地区別防災ワークショップの実施内容

(4)避難時における安全性の確保(避難先・避難経路・避難手段)

1)地区別避難先の検討【住民・行政（支援）】

避難の必要性については地区毎に温度差があることから、一次避難所、二次避難所および長期避難所の必要性について、地区毎に検討する必要がある。これについては、地区別避難計画の検討項目の一部として検討する必要がある。

2)避難用道路の指定・整備【行政】

道路管理者との協議の上で、各集落から指定避難所までの避難用道路を指定すると同時に、以下に示すような「避難用道路」の整備メニューの検討・実施することで対応する。

【避難用道路の整備メニュー(案)】

- ・水路沿いに柵を整備し、避難時の誤転落を防止する。
- ・避難経路上に避難方向等を示した看板や標識を掲示し、安全な避難経路を周知する。
- ・図 2.5.3 に示すようなアンダーパス等において、冠水時自動警報装置を設置する（例えば、JR 北陸線下のアンダーパス）。



図 2.5.3 JR 北陸線下のアンダーパス

3)水害時相互利用協定の細目協定締結【行政】

滋賀県と NEXCO 中日本との協働の取組による、県民の暮らしの安全・安心の確保と

地域の活性化および高速道路利用者の利便性向上を目的とした「滋賀県と中日本高速道路株式会社との包括的連携協定」¹⁴⁾が平成22年2月8日に締結された。今後は細目協定締結に向けた具体的内容について検討し、継続的に対応することを必要であると考えられる。

(5)法的な情報発信の無い河川への対応

1)住民と行政が互いに補完し合える仕組みの検討【住民・行政】

内水はん濫については、事前に予測情報を行政から住民に提供することは困難であるので、住民と行政が互いに補完し合えるような仕組み作りを検討することで対応する。具体的には、図2.5.4に示す内水はん濫現象を確認した場合に行政に通報する「浸水モニター」¹⁵⁾を住民から募集し、通報された情報を防災行政無線等で住民にフィードバックする仕組み¹⁵⁾¹⁶⁾等を地域・行政間で取り入れるなどの検討が必要である(浸水モニター制度)。

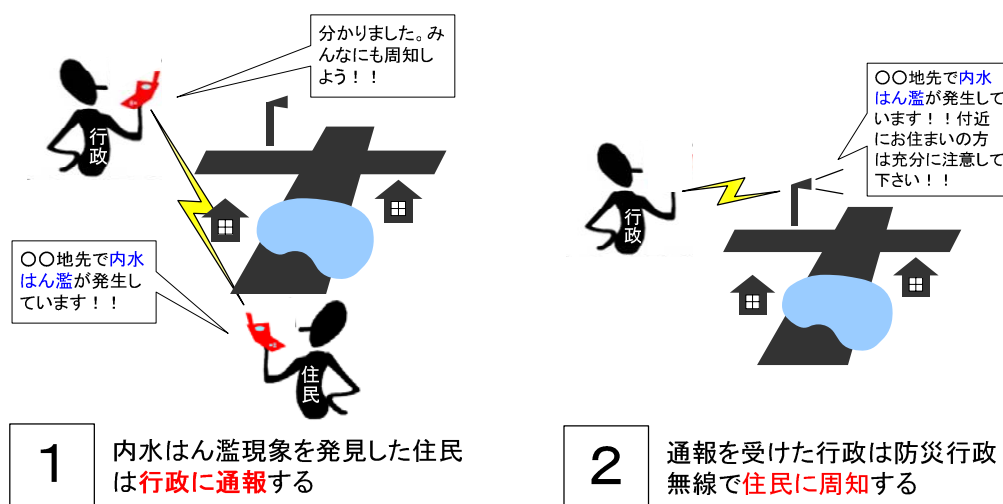
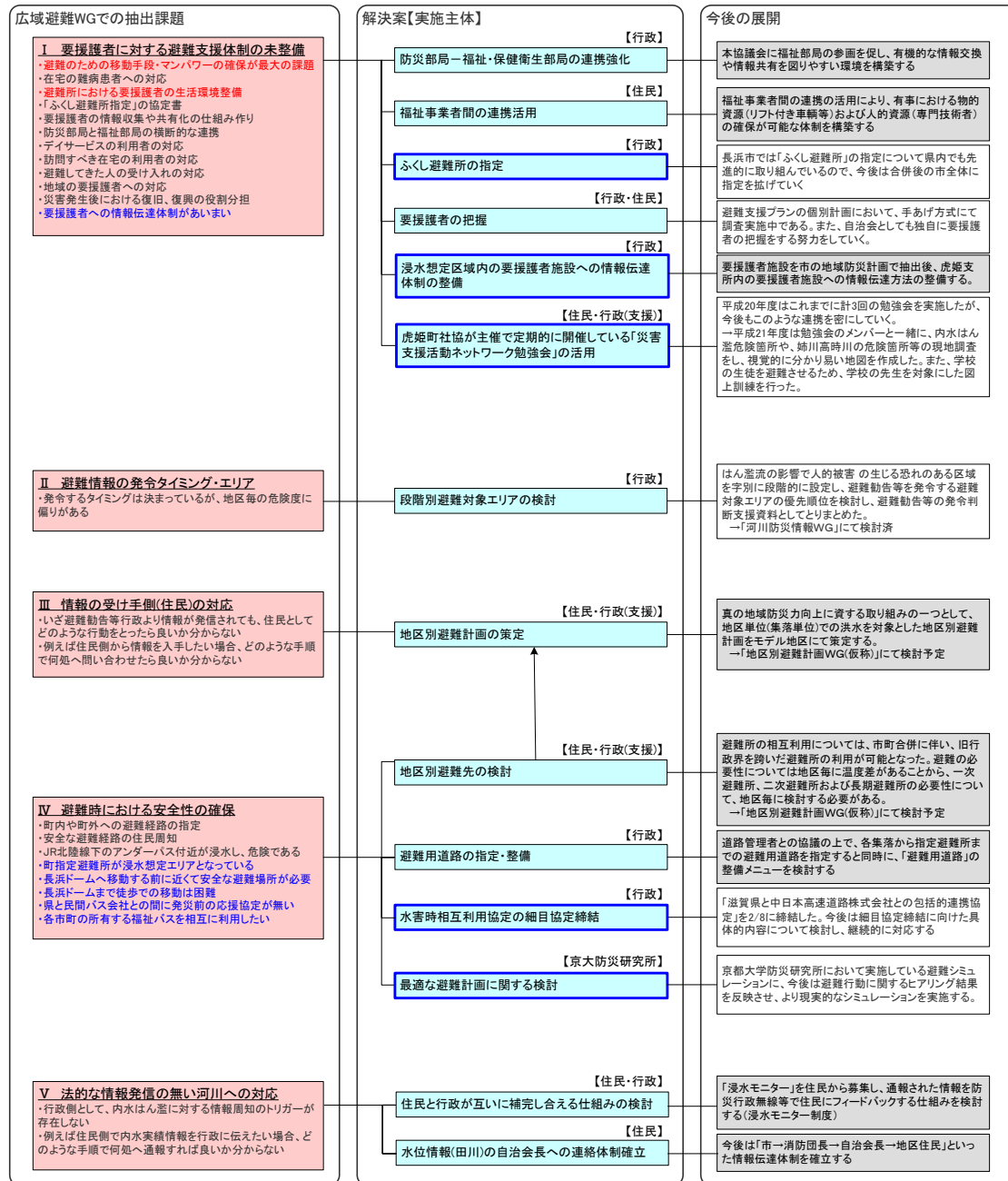


図 2.5.4 浸水モニター制度のイメージ

2)水位情報(田川)の自治会長への連絡体制確立【住民】

田川については、水防活動のための基準水位(水防団待機水位、はん濫注意水位)が定められているが、あくまで水防活動を対象にしているものである。そこで、情報伝達ルートとして、「市→消防団長→消防団員」と設定されており、自治会長へは伝達されていないのが現状である。そこで、田川の水位情報をもとにして、「市→消防団長→自治会長→地区住民」といった情報伝達体制を確立することで対応する。

第2章 洪水氾濫を想定した避難計画策定における課題と解決策



※上記の体系図の凡例

1)抽出課題 黒字：第2回以後の課題，青字：第1回DIGの課題，赤：第1,2回DIGの共通課題

2)解決課題 青枠：第1回DIG課題に対する解決策

3)今後の展開 今後の検討項目，検討済み項目

図 2.5.5 抽出課題と解決案の体系的図

2.6 おわりに

本章では、行政から住民の避難誘導までの情報伝達と、行政・住民および社会福祉団体における避難判断・行動を確認するための図上訓練を実施し、それぞれの立場での潜在的な課題を抽出し、避難計画に資する施策を示した。さらに、国・県・市町および社会福祉団体・自治会が共同で取り組む防災上の課題と解決すべき今後の施策について体系化した。

本章で得た結論を、以下に要約する。

- ・1回目の訓練では、外水氾濫を想定し、河川水位上昇から河川の破堤後の行動をシミュレーションした。その結果、社会福祉団体の水平避難が困難であることが明らかにされた。これに対して2回目の訓練では、水平避難と垂直避難を併用した段階的避難の可能性があることが示された。段階的な避難を選択することで、避難準備に要する時間が短縮され、災害時要援護者への直接的な支援に集中できると考えられる。
- ・この避難方法の選択により、新たに洪水時の対応、情報連絡体制などの課題抽出と解決策について検討した。これらの結果は、社会福祉団体における避難行動のひとつとして、今後の方向性を示したものと考えられる。一方で、行政は洪水の規模と各地先の安全度（どこまで浸水するのかなど）といった情報を、各団体や在宅の高齢者へ積極的に提供することが重要である。
- ・上述の訓練から災害時要援護者のみならず、行政・住民で避難に関する様々課題が抽出され、それに対する解決策について検討した。その結果、地域防災計画では表現できない細やかな情報を整理し、地区単位でのルール作りの必要性を指摘した。
- ・今回実施した図上訓練では、避難行動マニュアル等が正常に稼働することを確認するために実施した。洪水波形の具体的な提示や時間の設定を訓練のプレイヤーの環境に制約を与えることで、各機関の弱点、機関間の情報伝達や内容に関する課題を抽出することが訓練を通じて可能になることがわかった。
- ・今後、抽出された課題への対応策（マニュアルの見直し等）を検討し、再度訓練で確認するといったサイクルは、防災計画を検証する上で重要な取り組みであると考えられる。改善された避難計画等を、湖北圏域水害・土砂災害に強い地域づくり協議会が中心となって、再度図上訓練を行い、避難について検証していくことが必要である。

参考文献

- 1) 江原勝幸：福祉避難所における災害時要援護者の支援に関する考察，静岡県立大学短期大学部研究紀要20-W号，pp.1-22，2006.
- 2) 山本晴彦・山崎俊成・有村真吾・原田陽子・高山成・吉越恆・岩谷潔：2009年7月21日に山口県において発生した豪雨の特徴と土砂災害の概要，自然災害科学，29-4，pp.471-485，2011.
- 3) 内閣府：災害時要援護者の避難支援ガイドライン，2005.
- 4) 災害時要援護者の避難対策に関する検討会：災害時要援護者の避難対策事例集，総務省消防庁発行，2010.
- 5) 片田敏孝・金井昌信：土砂災害を対象とした住民主導型避難体制の確立のためのコミュニケーション・デザイン，土木学会土木技術者実践論文集，Vol.1，pp.106-121，2010.3
- 6) 滋賀県：湖北圏域水害・土砂災害に強い地域づくり協議会，2011.
(<http://www.pref.shiga.jp/h/kako/bousai/suigainitsuyoi/>)
- 7) 滋賀県：姉川・高時川浸水想定区域図（総括版），2007.
(<http://www.pref.shiga.jp/h/kako/bousai/shinsuisoutei/>)
- 8) 瀧健太郎・松田哲裕・鶴飼絵美・藤井悟・景山健彦・江頭進治：中小河川郡の氾濫域における超過洪水を考慮した減災対策の評価方法に関する研究，河川技術論文集，第15巻，pp.49-54，2009.6.
- 9) 国土交通省：水防法，<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S24/S24HO193.html>
- 10) 滋賀県：湖北圏域水害・土砂災害に強い地域づくり協議会広域避難の連携に関する基本協定書，2008.12.12
(<http://www.pref.shiga.lg.jp/h/kako/bousai/suigainitsuyoi/files/kohokusuigaikyou-kyouteisyo.pdf>)
- 11) 瀧健太郎・松田哲裕・鶴飼絵美・小笠原豊・西寫照毅・中谷恵剛：中小河川群の氾濫域における減災方治水システムの設計，河川技術論文集，第16巻，pp.477-482，2010.6.
- 12) 長浜市：長浜市避難支援・見守り支えあい計画（個別計画），2009.10.9
(<http://www.city.nagahama.shiga.jp/index.cfm/11,4702,100,545,html>)
- 13) 滋賀県・長浜市：滋賀県立長浜ドーム避難所利用承諾書，2008.3.25
(<http://www.pref.shiga.lg.jp/h/kako/bousai/suigainitsuyoi/setsumei.html>)
- 14) 滋賀県・中日本高速道路株式会社：滋賀県と中日本高速道路株式会社との包括的連携協定，2010.2.8 (<http://www.pref.shiga.lg.jp/chiji/kaiken/files/20100202.html>)
- 15) 眞間修一・竹村仁志・山下健作・吉田武志・刈谷尚夫・藤田正晴：猪名川浸水情報システムによる地域防災情報の共有，河川技術論文集，第17巻，pp.413-418，2011.7.
- 16) 内閣府，災害時要援護者対策の進め方について 報告書 取組事例，2007.

第3章 洪水予報河川の氾濫原を対象にした 避難勧告等の発令基準の設定に関する研究

3.1 はじめに

近年、直轄河川のみならず都道府県が管理する河川（指定河川）においても洪水予報河川、水位情報周知河川に指定し、氾濫の恐れのある流域住民への避難勧告・指示の発令や水防警報を目的に基準水位（避難判断水位、氾濫危険水位）が設定されている。特に設定されている指定河川は、比較的大きな流域である場合が多い。一方で、流域面積が小さく、洪水到達時間が短い中小河川の水位を監視しても、避難判断や行動に必要な時間的余裕がとれないばかりなく、堤内地の資産から状況も踏まえると、水位観測所の設置や基準水位が設定されていないケースが多い。

洪水発生に伴う氾濫に対する「備え」として、行政による防災教育を通じた意識啓発の活動が実施され、これらの活動は災害に対する備えに関する住民の意識向上につながっているものと考えられる。一方で、避難勧告等は、行政が住民に対して発令するものであり、受け手の住民はこの発令によって避難行動を開始することが前提となっている。逆に発令しないと避難しないという、行政の指示に依存するという指摘¹⁾もある。さらに、中小河川（群）では、避難判断基準が設定されていないために、避難勧告等の発令ができない、さらには、住民の自主的な避難に頼ることになるという、防災上の課題がある。このような課題に対して、内閣府等が公表した「大雨災害における避難のあり方等検討会報告書」²⁾では、自らの命を守るための行動や危険な状況下での避難回避といった事項を避難の基本的な考え方とし、地方自治体に対して地域特性に応じた早期避難、屋外避難の回避、垂直避難といった選択もあることが提示されている。

滋賀県では、気象状況の変化による集中豪雨の頻発化、超過洪水の生起による河川整備の限界、ライフスタイルの変化に伴う地域防災力の脆弱化、および財政状況の逼迫に

伴うハード整備の遅れといった、近年顕在化している防災上の問題を抱えている。同県ではこのような状況下で、「水害から人命を守り、壊滅的な被害を防ぐ」ために、従来の河道掘削やダム建設等と並行して、住民が暮らす川の外（流域）における自助・共助・公助を組み合わせた減災対策に関する施策についても強く推進している³⁾。滋賀県湖北圏域では上記の方針を受け、関係自治体（長浜市・米原市）、国、県、学識経験者で構成される「湖北圏域水害・土砂災害に強い地域づくり協議会」を設置し、様々な分野、主体が一丸となって当該圏域における減災対策について検討してきた⁴⁾。上記の施策を支援するために、避難勧告等の行政から発信する河川防災情報の精度向上（公助）、住民自らが適切に状況判断できる住民主導型避難体制確立に向けての支援（自助・共助）といった、自助・共助・公助のバランスのとれた地域防災力を確立するための検討が行われてきた。

従来から、地域防災力の向上を目的とした社会学的な研究⁵⁾⁶⁾⁷⁾が多く行われてきた。しかしながら、内外水氾濫解析や河道の水理解析を基本とし、超過洪水に対するリスクを踏まえ、地域社会における洪水対応の関係を明確にし、具体的な避難判断基準やそれにもとづく避難計画等に反映した事例はない。

本章では、避難勧告等を軽視されないために、地元と行政の持つ洪水氾濫に関する情報を収集し、水防・防災体制に資する情報にすることを目的として、避難判断基準の設定に関する検討を行った。まず、避難勧告・指示を発令する自治体において、水位観測所の水位情報だけで判断できないという現状の施策と自治体担当者との認識のズレを解消するための検討を行った。次に、河川防災情報の現状と課題について述べ、課題に対して水位観測所と地区別の危険水位との関連性について整理した。本章では、滋賀県長浜市および米原市を流れる姉川・高時川とその堤内地に内水および外水氾濫の両方を考慮できる水理モデルを適用し、氾濫域における避難判断基準を検討した。この基準の設定に際し、想定した破堤時点までの避難勧告等の発令時におけるきめ細かい情報を付加する場合の地区の選定と個々の情報種別について検討を行った。

3.2 危険箇所の水理特性と防災上の意義

3.2.1 危険箇所の把握

一級河川姉川・高時川は水防法に基づく洪水予報河川に指定されており、洪水予報を行う基準地点として5箇所の水位観測所が設定されている。洪水予報は一連区間のネック箇所を対象に川全体として発表されているが、ネック箇所以外においては安全側の設定となり、現場の実情と乖離する問題が市町へのアンケート調査で明らかとなった。図3.2.1には、アンケート調査で把握した危険箇所の位置を示している。さらに、洪水時に各市町や沿川自治会が巡回する箇所が、地元が昔から経験的に把握している箇所（以下、経験的危険箇所）として存在することが明らかになった。

上記を踏まえ、市町における避難勧告・指示の発令タイミングと対象エリアの判断を支援することを目的とした、図3.2.2に示すきめ細かい河川防災情報と市町の避難判断

基準を整備することは、防災上有意義であると考えられる。



図 3.2.2 経験的危险箇所の調査

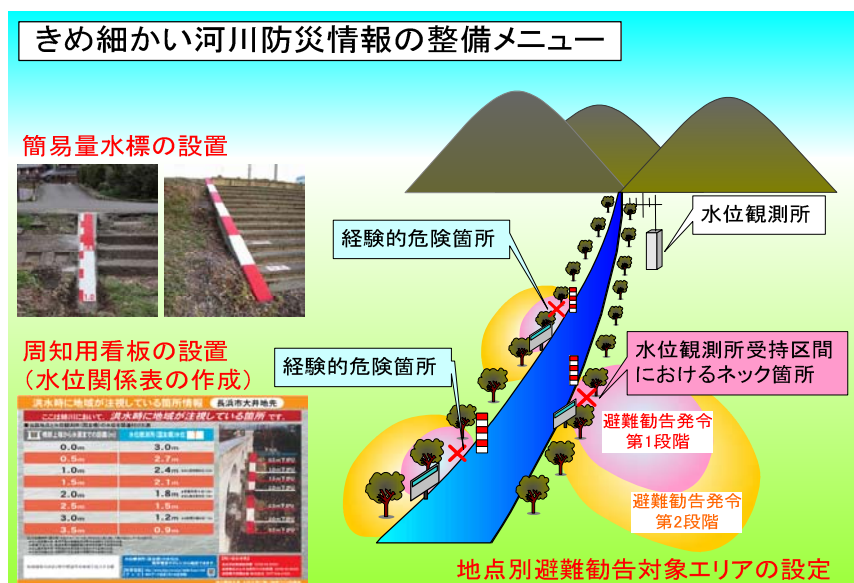


図 3.2.1 滋賀県姉川・高時川で実施した河川情報整備メニュー

3.2.2 危険箇所を利用した防災情報の充実

市町が発令する避難勧告の発令タイミングの決定を支援するため、川の中の防災情報の充実化を図った。具体的には、姉川・高時川で選定した15か所を対象に、現場の水位状況を近傍テレメータ水位から推定できるように、図3.2.1に示すそれぞれの地先が把握している経験的危険箇所と上流の水位観測所との水位を関連付けた「水位関係表」を地点毎に作成し、併せて水位関係表に合わせた「簡易量水標」の設置および平常時の周辺住民への周知を目的とした「周知用看板」の設置も行った。

なお、水位の関連付けについては、準二次元不等流計算を実施し対象地点毎に水位流量の関係を設定した。さらに、水位観測所の基準水位に相当する流量から、対象地点の水位流量の関係から水位観測所の水位と関連性について整理した。

3.3 氾濫特性

3.3.1 氾濫解析の概要

本章では、瀧ら⁸⁾統合水理モデルを適用し、氾濫原の浸水深や流速といった水理諸量を算定した。当モデルは、流出域、中小河川・水路網の氾濫流といった一連の水理現象を総合的に解析できる数値計算モデルである。流出域においては、合成合理式による流出解析モデルから流出量を求め、時間遅れを考慮して河道上流端に与えた。河道域の流れの解析には、現況河道縦横断面データが存在する区間を対象に、一次元不定流解析モデルを適用している⁹⁾。さらに、氾濫流については、平面二次元氾濫解析モデルを適用している¹⁰⁾。

氾濫解析、氾濫モデルの詳細な計算条件は、表3.3.1の通りである。これらは、瀧ら⁸⁾が設定した計算条件と基本的に同じである。

3.3.2 氾濫特性の把握

本検討では、姉川高時川の破堤氾濫および越水氾濫に加えて、内水氾濫も考慮した氾濫解析を実施した。氾濫解析結果を下に、対象氾濫原における地形的な条件からブロック分割した範囲での氾濫特性を整理したものを図3.3.1に示すとともに、氾濫時の状況を以下のように把握した。

- ・ブロック①では、越水した水は背後地の無堤地区に貯留される。
- ・ブロック②では、氾濫流は、高時川に沿って流下する。また、高時川左岸堤防や山田川堤防に囲まれるため、水田では氾濫流が貯留されやすい。
- ・ブロック③では、氾濫流は、湖岸に向けて拡散しながら流下する。さらに、高時川右岸堤防や姉川右岸堤防及び湖周道路に囲まれるため、水田では氾濫流が貯留されやすい。
- ・ブロック④では、氾濫流は、拡散しながら姉川と高時川合流点付近へ流下する。さらに、姉川と高時川の堤防に囲まれるため氾濫流が貯留されやすく、特に JR 北陸

- 本線より西側では地盤高が低く、地形勾配が緩いため、氾濫流が貯留されやすい。
- ・ブロック⑤では、氾濫流は、市街地に向けて拡散して流下する。また、姉川左岸堤防と湖周道路により囲まれるため、水田では氾濫流が貯留されやすい。
 - ・ブロック⑥では、氾濫流は、川に沿って流下する。また、姉川と草野川の堤防に囲まれるため氾濫流が貯留されやすい。
 - ・ブロック⑦では、氾濫流は、川に沿って流下し、姉川と丘陵部に囲まれるため氾濫流が貯留されやすい。

表 3.3.1 氾濫モデルの設定

項 目	内容または解析条件
河道設定	姉川・高時川を河道として設定。
河道断面測量年度	①LPデータ ・「H18滋賀県内主要河川の航空レーザー測量成果、近畿地方整備局」 ・「H15琵琶湖沿岸の航空レーザー測量成果、琵琶湖河川事務所」 ②既往測量図面を基本とした河道断面
粗度係数	原則として0.030
出発水位	等流水深
氾濫解析手法	・河道：一次元不定流 ・氾濫原：二次元不定流
氾濫原のメッシュ	50mメッシュ
氾濫原の地盤高	LPデータおよび数値地図のメッシュ内の平均値 ・「H18滋賀県内主要河川の航空レーザー測量成果、近畿地方整備局」 ・「H15琵琶湖沿岸の航空レーザー測量成果、琵琶湖河川事務所」 ・「数値地図50mメッシュ標高、国土地理院」
氾濫原の地目面積	国土数値情報土地利用区分(100mメッシュ)・面積(1kmメッシュ)を使用して算出
建物占有率	土数値情報土地利用メッシュを使用して算出
支川の考慮	支川を考慮する
水路	下水道計画で明示されている水路を考慮する
圃場	圃場計画で明示されている圃場を考慮する
排水施設	「淡海よ永遠に 琵琶湖開発事業誌 第Ⅲ・Ⅳ編より」を参照して設定。

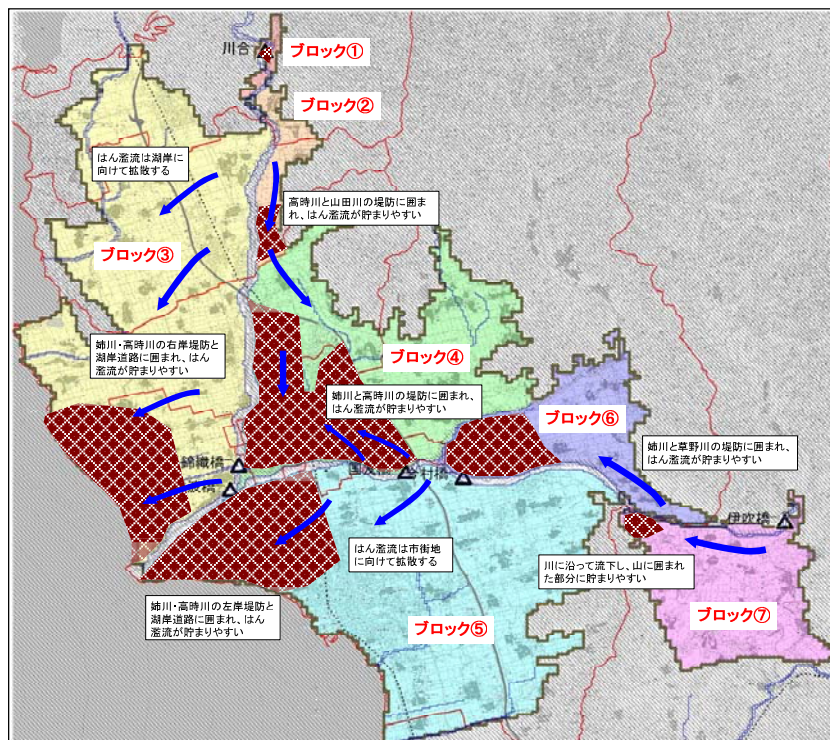


図 3.3.1 氾濫原の内外水氾濫流の特性

3.4 避難勧告等の発令基準の設定

3.4.1 避難判断の考え方

洪水時には、姉川・高時川等からの外水氾濫に先立って、水路等からの内水氾濫が生じる地区が発生する可能性が高いことから、地区毎に内水氾濫の影響や氾濫の時間的変化も考慮した氾濫特性を把握した上で、自宅2階への垂直避難も念頭に置いた避難判断基準を検討した。

本検討を行うにあたっての基本的考え方を以下に示す。

- ・避難行動は「立退き避難」を基本とする。
- ・大雨災害時には垂直避難のような「一時避難」が許容できることから、同災害時には「立退き避難」のみならず、「一時避難」も含めた複数の選択肢を用意しておくことが、人的被害を軽減する上で重要である。
- ・氾濫による人的被害リスクが高い地区と低い地区を整理した上で、リスクが高い地区については「立退き避難」を前提とした避難判断基準（指標・トリガ）とする。リスクが低い地区については「一時避難」の可能性も念頭に置いた基準とする。
- ・避難判断指標としては、姉川・高時川を対象にして発令される「洪水予報（氾濫警戒情報）」を基本とするが、発令時に想定される堤内地の歩行困難区域も勘案し、別途基準が必要な地区については、その指標について検討する。
- ・検討対象とする地区単位については、小学校区を基本とし、河川によって分断される場合や学区内において氾濫特性が異なる場合は必要に応じて分割する。

上記の設定における基本的な考えの下で、人的被害リスクの評価、歩行困難区域といった洪水氾濫時の危険性を十分に考慮した避難勧告等発令基準の検討を行った。

①人的被害リスク評価

氾濫計算結果より、人的被害リスク評価を行った。

(人的被害リスク評価指標：家屋水没、床上浸水、家屋流出)

②歩行困難区域の把握

氾濫警戒情報が発令される時点（避難勧告の発令目安）から氾濫危険情報が発令される時点（住民の避難完了目安）における時系列の氾濫解析結果より、外水氾濫前における立退き避難行動に影響を与える「歩行困難区域」を抽出した。

③地区別避難判断基準(案)の設定

上記検討結果を踏まえ、地区別の避難判断基準（指標・トリガ）および避難行動手法（立退き避難、一時避難）を設定した。

3.4.2 人的被害リスク区域の把握

洪水氾濫により人的被害が発生する可能性のある地区は、最優先に避難すべき地区である。これらの地区を抽出するにあたり、表 3.4.1 に示す指標を用いた。氾濫流による人的被害リスクの評価指標として、「家屋水没」、「床上浸水」および「家屋流出」といった評価指標の判定に使用する閾値として、既往の調査研究から引用して、浸水深、流体力から設定した。

氾濫解析結果から、人的被害（家屋水没、床上浸水、家屋流出）を受ける可能性が高い小学校区および人的被害有無を抽出した。表 3.4.2 には、人的被害リスクを評価した結果を示している。これによれば、姉川・高時川流域においては、川沿いの小学校区で床上浸水が発生する可能性が高く、人的被害を受ける集落が多く存在することがわかる。また、水平避難を必要とする家屋水没と家屋流出の発生する可能性の高い小学校区（表中赤枠）多い反面、人命への危険度が高いのは6地区であることが推測された。これらの地区のうち、高時小学校区、虎姫小学校区は、洪水予報に伴う立ち退き避難、あるいは広域避難を要する地区である。また、残りの地区の地区においても、洪水予報、氾濫状況に応じて、立ち退き避難を行う必要のある地区であることが推測される。これらの小学校区の位置と浸水状況を重ねたものを図 3.4.1 および図 3.4.2 に示す。図 3.4.1 は流体力が $2.5\text{m}^3/\text{s}^2$ 以上となる地区、図 3.4.2 は浸水深が 3.0m 以上となる地区を示している。これらの地区は、防災上優先的に、立ち退き避難を前提とした基準とすることが必要であると考えられる。

また、このような地区を対象にしたソフト対策の積極的な推進を行うための戦略的な指標となりうることを示しているものと考えられる。

表 3.4.1 被害指標の設定

被害指標	内 容	閾 値
家屋水没	家屋の軒下程度まで浸水する状態	浸水深：3.0m 以上 ⁸⁾
床上浸水	家屋の一階床上まで浸水する状態	浸水深：0.5m 以上
家屋流出	氾濫流により家屋ごと流され倒壊する状態	流体力：2.5 m ³ /s ² 以上 ⁹⁾

表 3.4.2 人的被害リスク評価結果一覧

自治体名	小学校区名	人的被害指標			備 考
		家屋水没	床 上 浸 水	家 屋 流 出	
長浜市	高時小学校区	●	●	●	家屋水没：木之本町川合 家屋流出：木之本町古橋
	木之本小学校区	—	●	—	
	伊香具小学校区	○	○	—	
	富永小学校区	—	●	○	
	高月小学校区	—	●	○	
	田根小学校区	○	●	—	
	七郷小学校区	—	●	—	
	古保利小学校区	—	○	—	
	小谷小学校区	○	●	○	
	速水小学校区	○	●	●	家屋流出：湖北町馬渡
	朝日小学校区	○	○	—	
	湯田小学校区	○	●	●	家屋流出：内保町
	虎姫小学校区	●	●	●	家屋水没：中野町，大寺町，月ヶ 瀬町，新旭町，長田町，柿ノ木 家屋流出：大井町
	びわ北小学校区	○	●	○	
	びわ南小学校区	○	●	○	
	七尾小学校区	○	●	○	
	神照小学校区	○	●	●	家屋流出：国友町，泉町
	長浜北小学校区	—	●	—	
	長浜小学校区	—	●	—	
	長浜南小学校区	—	●	—	
米原市	大原小学校区	●	●	○	家屋水没：村居田

●：人的被害を受ける区域が集落内に及び、人命への危険度が高い ○：人的被害を受ける区域が存在するが、集落には及ばない —：人的被害を受ける区域が存在しない可能性が高い

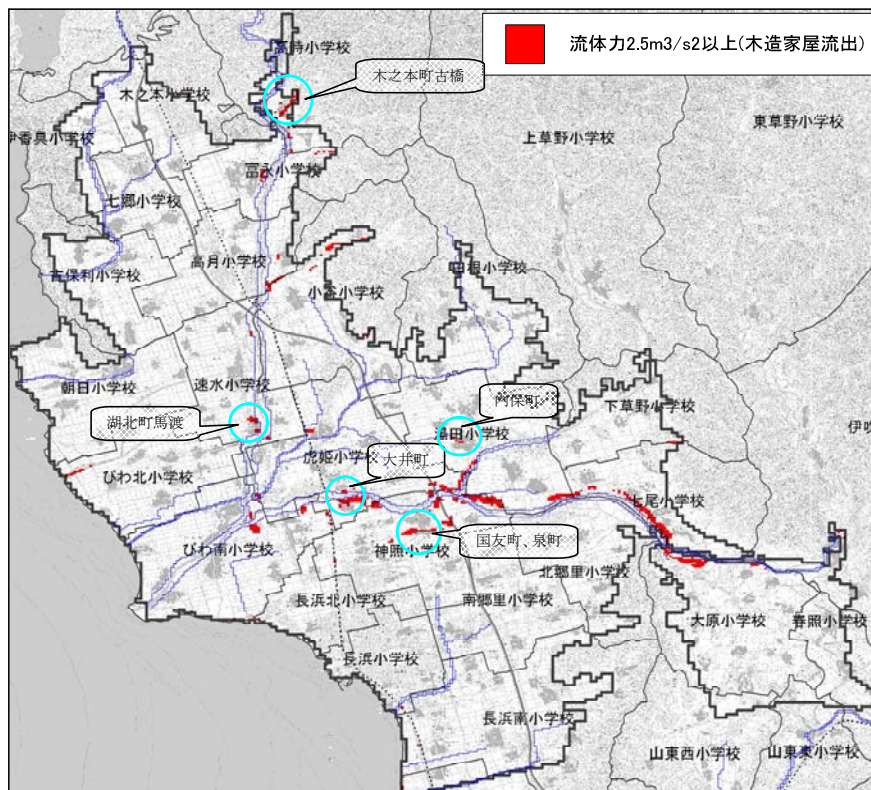


図 3.4.1 流体力 $2.5\text{m}^3/\text{s}^2$ 以上となる区域

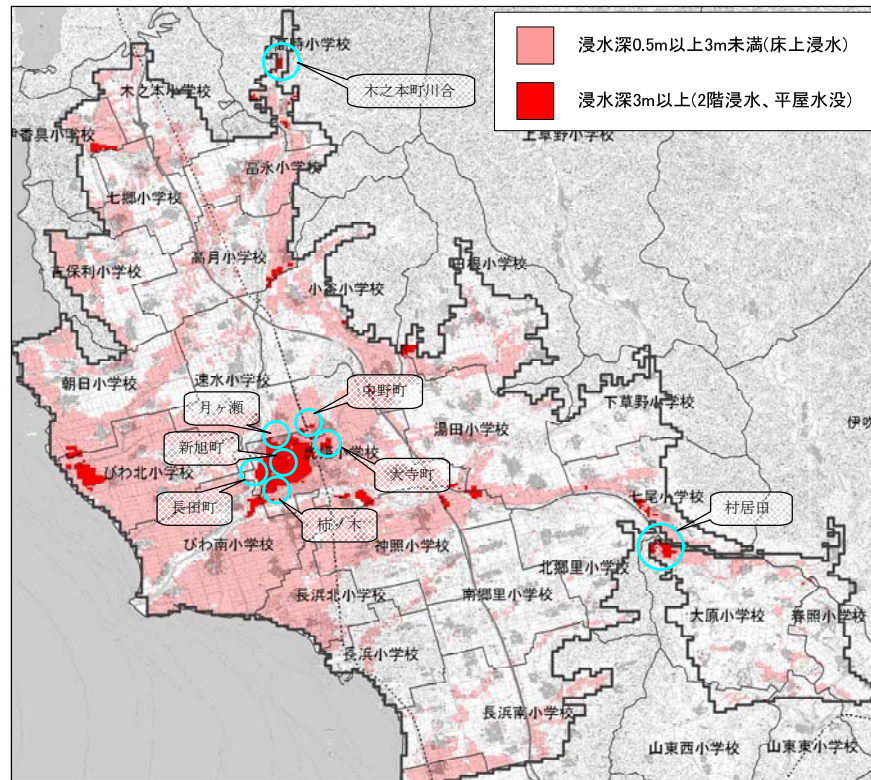


図 3.4.2 浸水深 3m 以上および歩行困難となる区域

行政から避難勧告等を発令する場合、内水氾濫が先に発生することから、外水氾濫になるまでの間で堤内地がどのような状況なのかを推測しておく必要がある。堤内地の氾濫によって、浸水が発生し、歩行が困難な状態となっているのにも関わらず、避難勧告を発令しても、住民は、逆に危険さらされる可能性があるため、氾濫解析結果と河道内の水位変化を同時に整理することで、歩行による避難を可能とするタイミングを把握する。

まず、氾濫警戒情報が発令される時点（避難勧告の発令目安）から氾濫危険情報が発令される時点（住民の避難完了目安）における時系列の氾濫解析結果を整理し、外水氾濫前における立退き避難行動に影響を与える「歩行困難区域」を抽出した。なお、外水氾濫前における立退き避難行動に影響を与える「歩行困難区域」として、図 3.4.3 に示す須賀ら¹³⁾による水深・身長比と流速の関係から見た水中での歩行可能領域を用いるものとした。なお、設定する身長としては、文部科学省の年齢別体格測定結果（平成 20 年調査）を参考に、「成人男女の平均値である 163cm」および「小学 1 年生男女の平均値である 116cm」の 2 ケースを設定した。

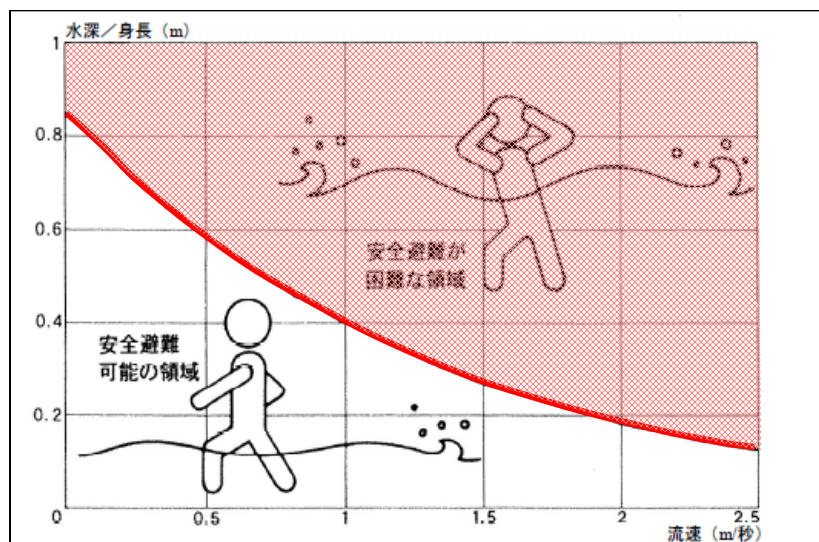


図 3.4.3 水深・身長比と流速の関係から見た水中での歩行可能領域¹³⁾

次に、立退き避難行動は外水氾濫発生前に行うことから、姉川・高時川において最初に氾濫警戒情報が発令されてから氾濫危険情報が発令されるまで（避難勧告の発令目安から住民の避難完了目安）の間における時間で評価を行った。

図 3.4.4 および図 3.4.5 に示す氾濫シミュレーション結果によると、姉川において最初に氾濫警戒情報が発令されるのは難波橋水位観測所であり、計算開始後 3 時間 50 分後から 9 時間 10 分後までが評価対象期間となる。一方、図 3.4.6 および図 3.4.7 に示す高時川において最初に氾濫警戒情報が発令されるのは錦織橋水位観測所であり、計算開始後 10 時間 10 分後から 11 時間 10 分後までが評価対象期間となる。これら氾濫警戒情報から危険情報が発令される時間を包絡する、3 時間 50 分後から 11 時間 10 分後ま

でを評価対象期間とした。さらに、モデルハイエトによる各観測所の水位変化を図 3.4.8 に示す。これによれば、各水位観測所において避難判断水位に到達する時間を見ると、姉川高時川の最下流の難波橋でもっと早いことがわかる。これは、二河川の流出量によるものと考えられる。また、平成 22 年 7 月 4 日洪水における各水位観測所の水位変化を図 3.4.9 に示す。これらの変化から、モデルハイエトに基づく計算結果と同様の傾向が示されており、避難勧告の判断を行う際に、難波橋の水位に注目しておくことが流域における防災上の初動体制や避難を判断する上での一つの目安として設定できる可能性があることを示唆している。

氾濫解析結果から、姉川・高時川の各々において最初に氾濫警戒情報が発令されてから氾濫危険情報が発令されるまで（避難勧告の発令目安から住民の避難完了目安）の間に、歩行避難が困難となる区域を表 3.4.3 および表 3.4.4 に抽出した。さらに、抽出した地区の位置を図 3.4.10 および図 3.4.11 に示す。これによれば、姉川・高時川本川からの外水氾濫前を対象に、成人男女のケースでは 3 学区、小学 1 年男女のケースでは 4 学区内の国道および県道が歩行困難となる可能性が高いと推測した。また、田畑が歩行困難となった学区においては、農道等を避難路として利用していることも考えられるため、地区別避難計画を検討していく上で、避難路の危険性を周知（まるごとまちごと H M など）していくことが必要と考えられる。

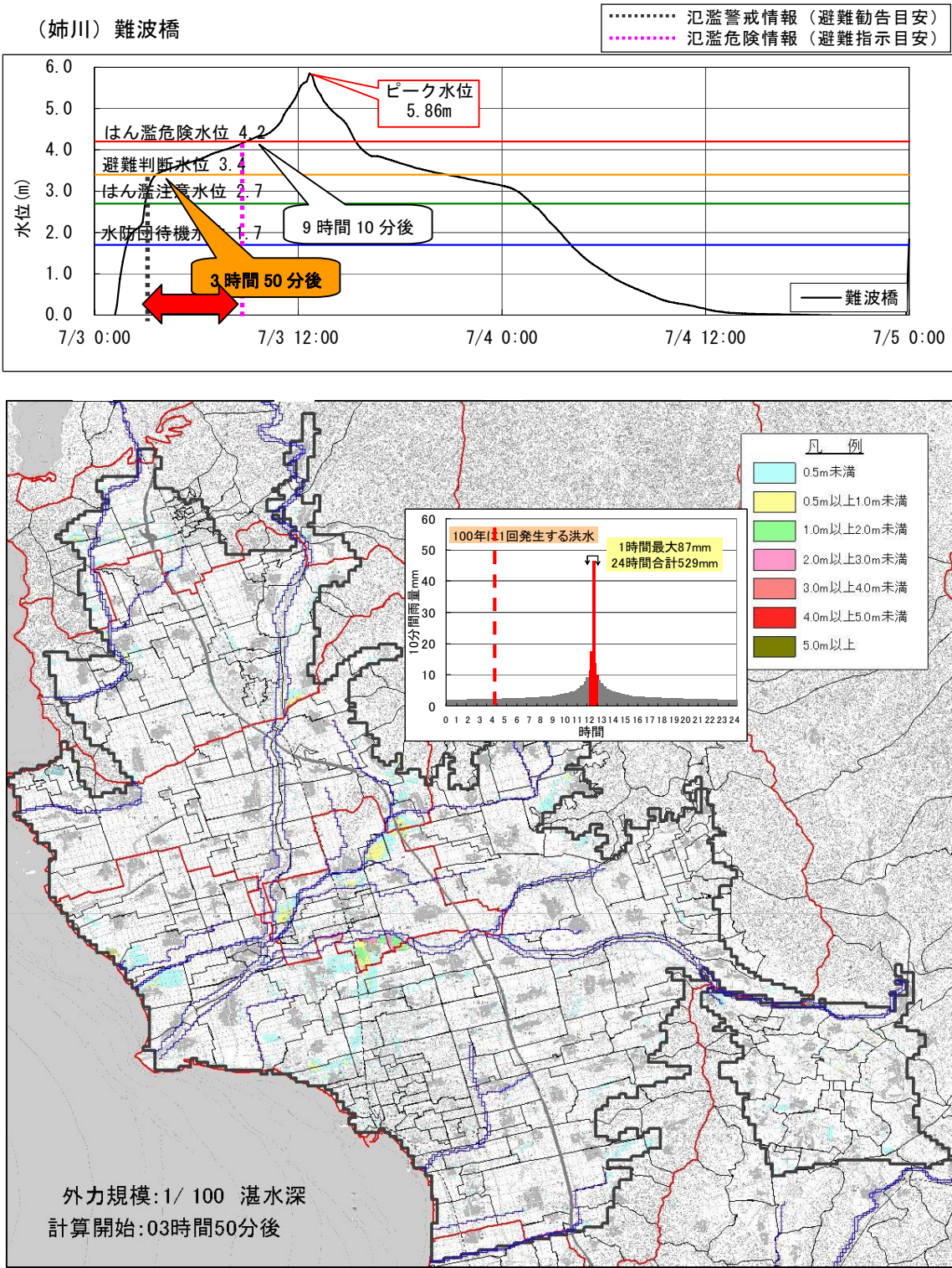


図 3.4.4 姉川 氾濫警戒情報発令時における浸水状況

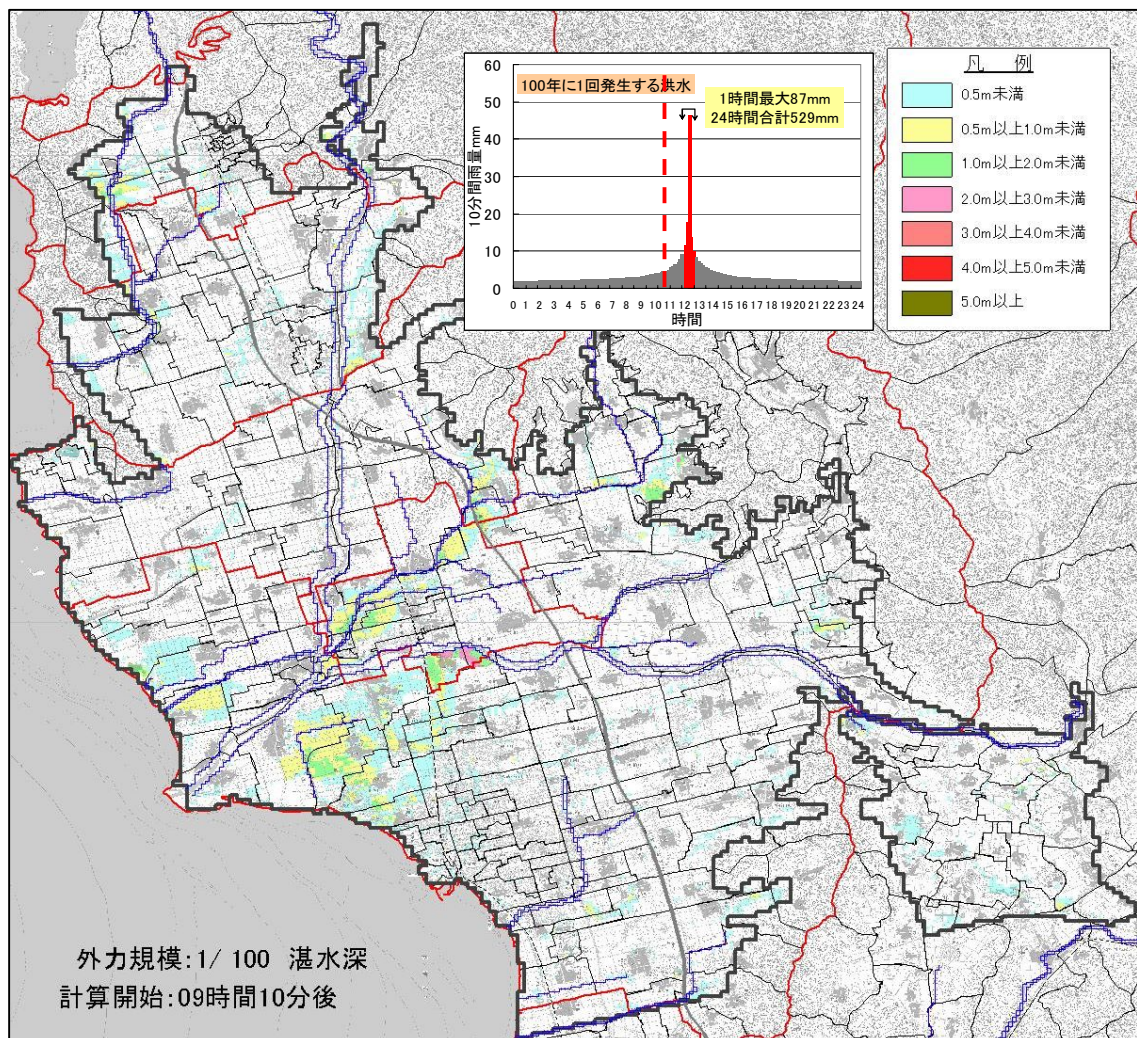
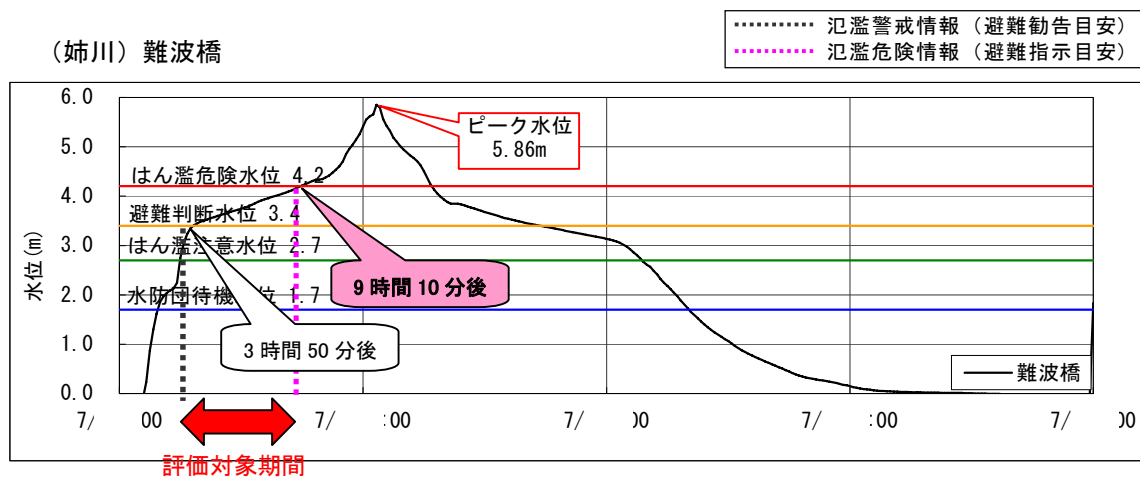


図 3.4.5 姉川 氾濫危険情報発令時における浸水状況

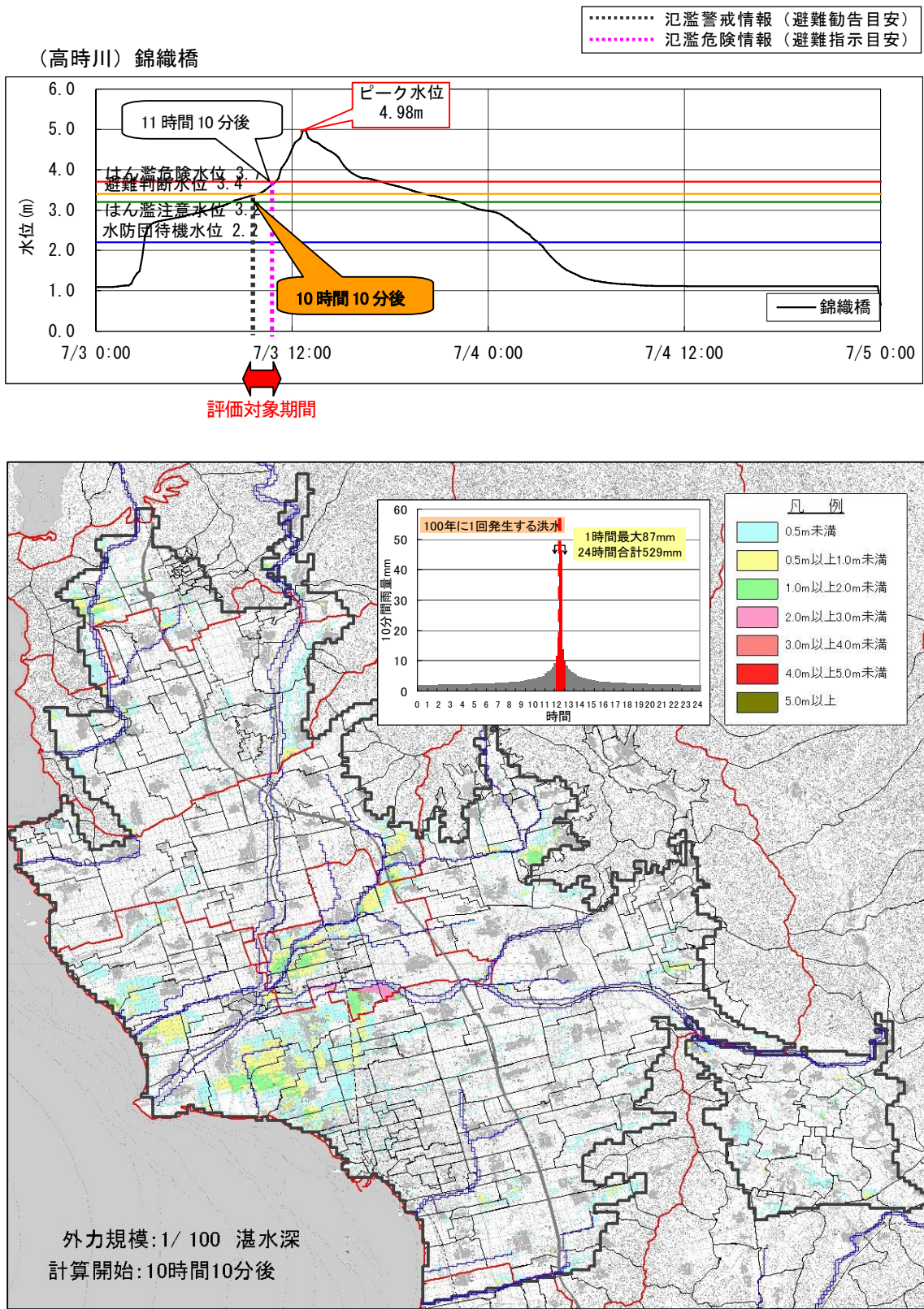


図 3.4.6 高時川 氾濫警戒情報発令時における浸水状況

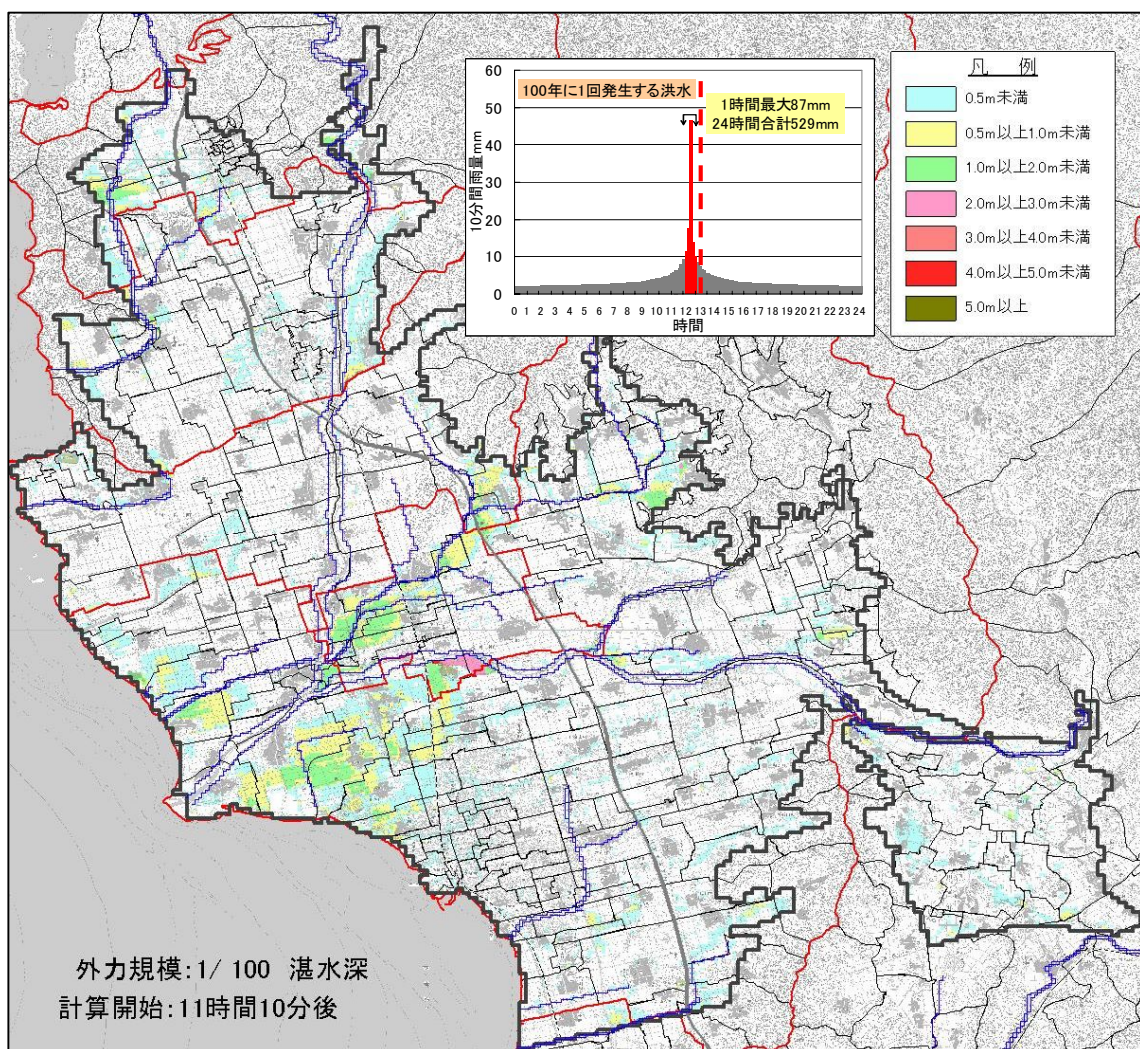
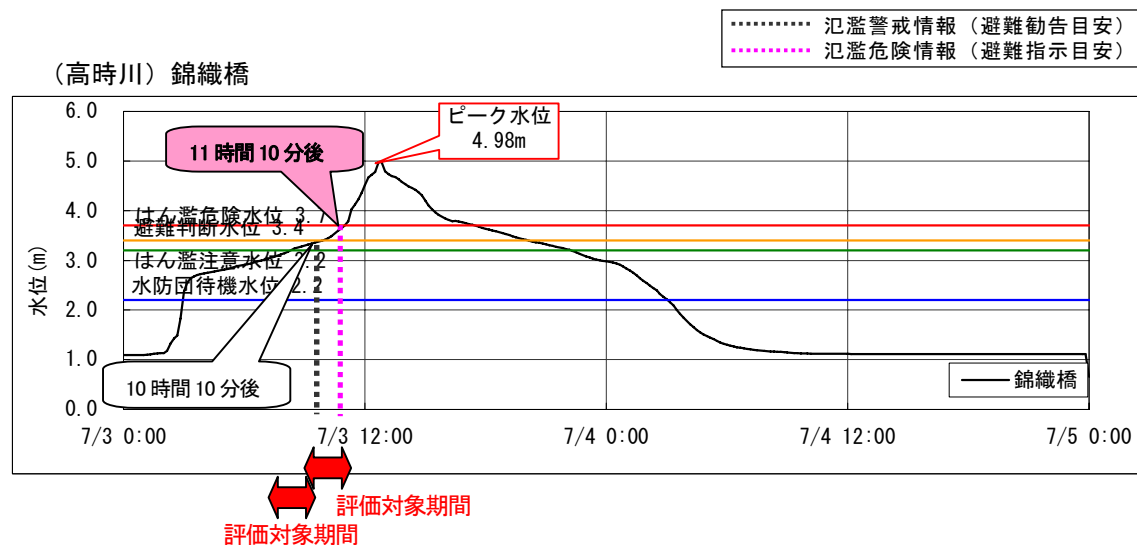


図 3.4.7 高時川 氾濫危険情報発令時における浸水状況

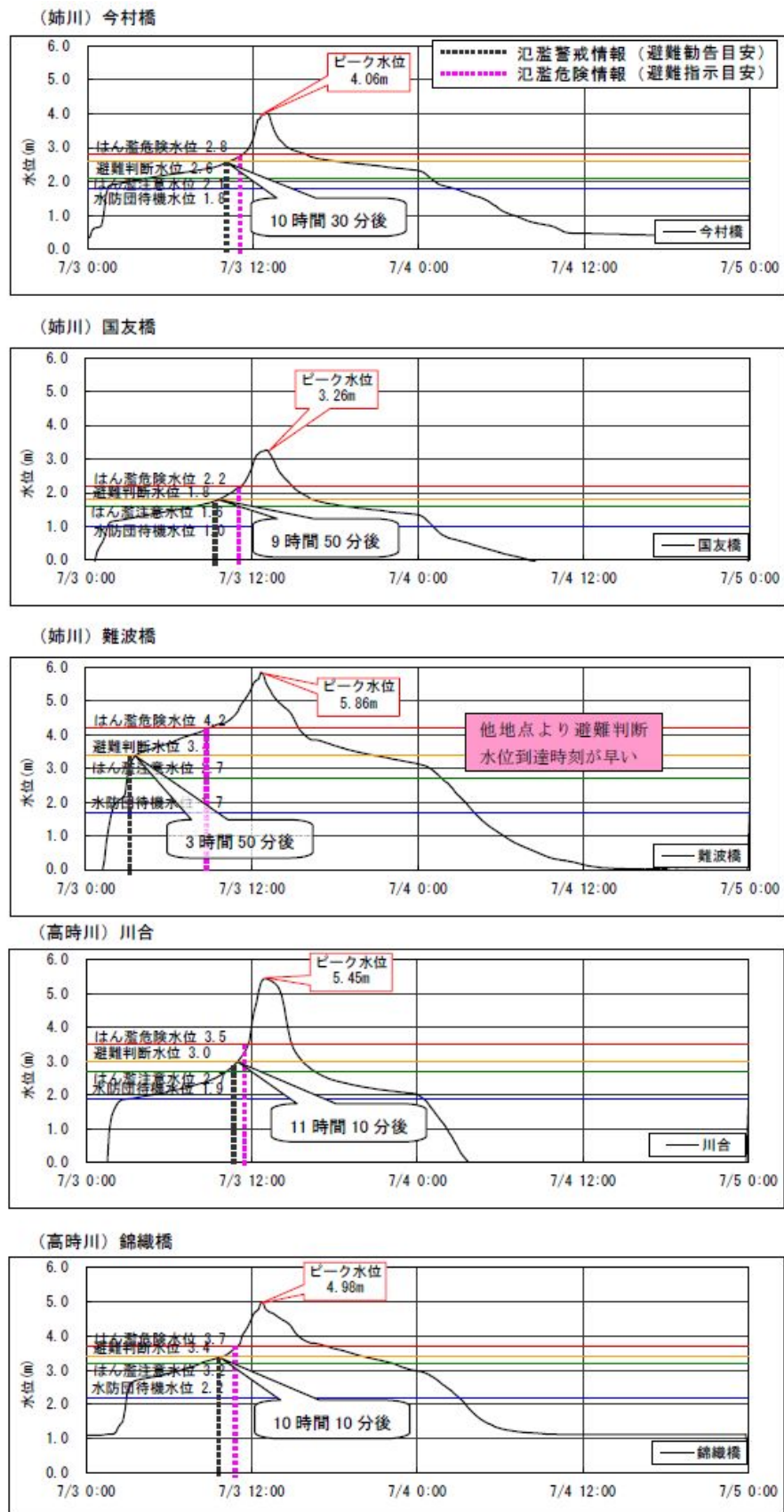


図 3.4.8 各水位観測所地点における計算水位ハイドログラフ(確率規模: 1/100)

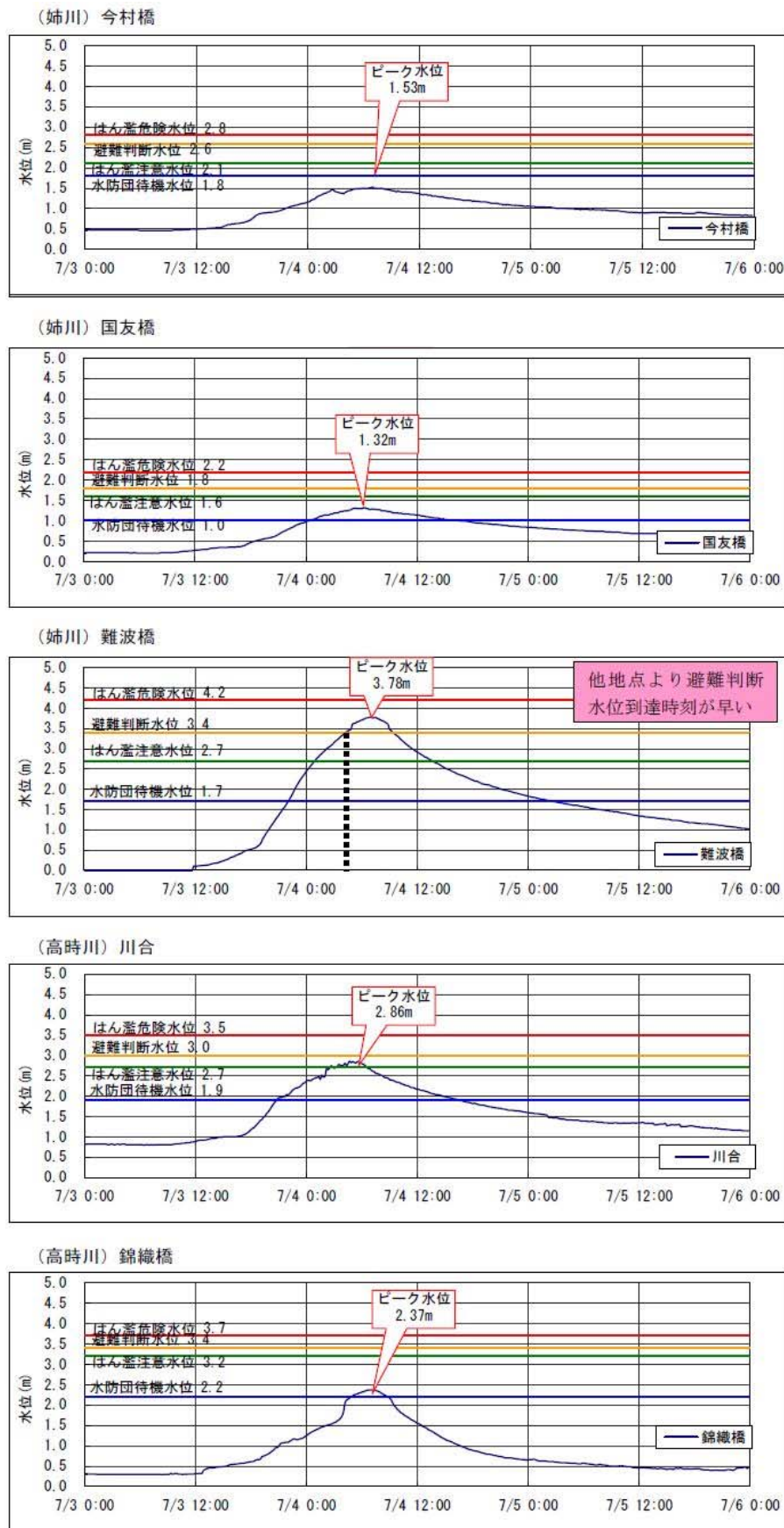


図 3.4.9 各水位観測所地点における実績水位ハイドログラフ(平成22年7月4日出水時)

表 3.4.3 歩行困難区域評価結果一覧（成人男女平均）

自治体名	小学校区名	歩行困難区域の評価	備 考
長浜市	高時小学校区	○	田畑（各地先）
	伊香具小学校区	○	田畑（木之本町西山）
	富永小学校区	●	県道（高月町雨森）
	高月小学校区	○	田畑（高月町森本）
	田根小学校区	○	田畑（木尾町）
	小谷小学校区	○	田畑（湖北町留目）
	湯田小学校区	○	田畑（西野町）
	虎姫小学校区	●	宅地（新旭町） 県道（大井町南側） 田畑（田町、月ヶ瀬町）
	びわ北小学校区	○	田畑（早崎町）
	びわ南小学校区	○	田畑（川道町、細江町）
	長浜北小学校区	●	県道（祇園町） 田畑（相撲町）
米原市	大原小学校区	○	田畑（朝日）

●：歩行困難区域が集落内や主要道路（国道・県道）に及ぶ等、避難への影響が大きい

○：歩行困難区域が田畑であるが、農道等を避難路として利用している場合は注意を要する

表 3.4.4 歩行困難区域評価結果一覧（小学1年男女平均）

自治体名	小学校区名	設定身長別の評価	備 考
長浜市	高時小学校区	○	田畑（各地先）
	伊香具小学校区	○	田畑（木之本町西山）
	富永小学校区	●	県道（高月町雨森）
	高月小学校区	○	田畑（高月町森本）
	田根小学校区	●	県道（木尾町）
	小谷小学校区	○	田畑（湖北町留目）
	湯田小学校区	○	田畑（西野町）
	七尾小学校区	○	田畑（佐野町）
	虎姫小学校区	●	宅地（新旭町、大井町南側） 県道（大井町南側） 田畑（田町、月ヶ瀬町）
	びわ北小学校区	○	田畑（早崎町）
	びわ南小学校区	○	田畑（川道町、細江町）
	長浜北小学校区	●	県道（祇園町） 田畑（相撲町）
米原市	大原小学校区	○	田畑（朝日）

●：歩行困難区域が集落内や主要道路（国道・県道）に及ぶ等、避難への影響が大きい

○：歩行困難区域が田畑であるが、農道等を避難路として利用している場合は注意を要する

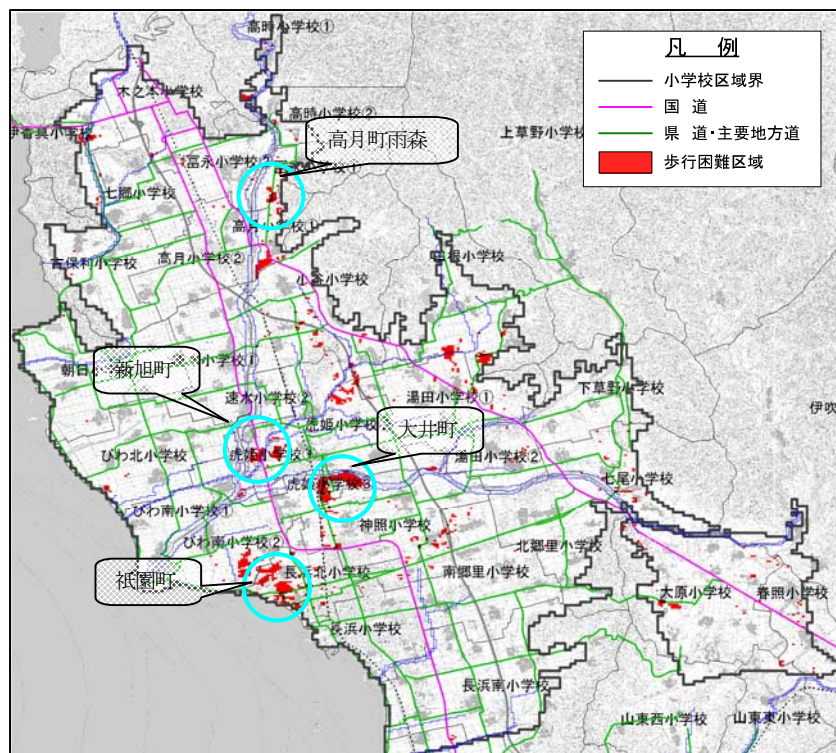


図 3.4.10 成人男女平均身長での歩行困難区域評価

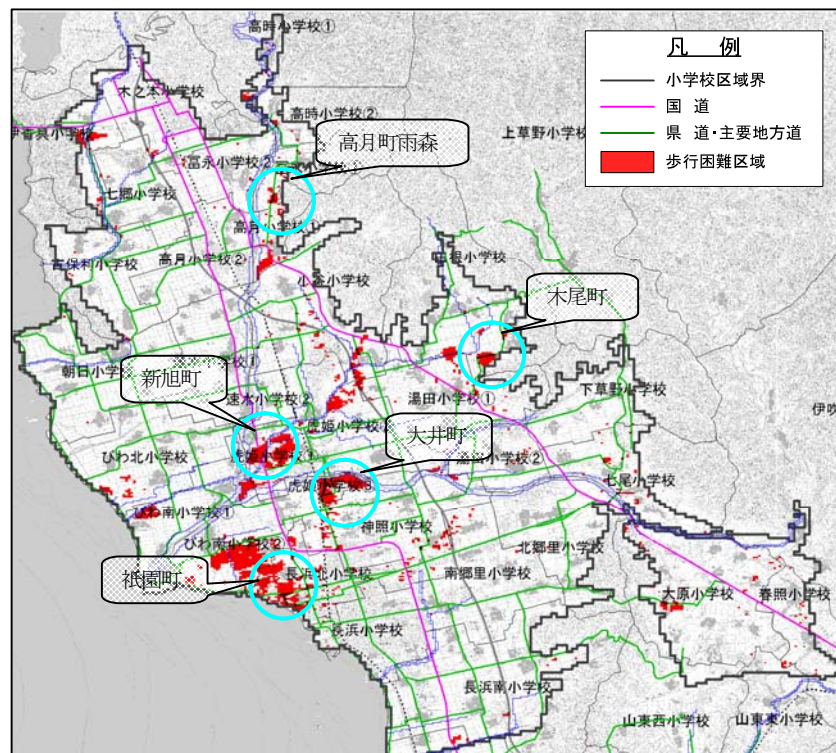


図 3.4.11 小学校1年男女平均身長での歩行困難区域評価

3.4.3 地区別における避難判断基準

避難勧告発令の大きな括りとして「外水氾濫ブロック」を基本とした。ただし、避難勧告発令の地区単位としては小学校区を基本とし、ブロックを跨いで分断される場合や学区内において氾濫特性が異なる場合は必要に応じて分割した。分割した結果を図3.4.12に示す。この分割に基づき、避難勧告発令の一つの目安となる氾濫警戒情報を基本とした、避難勧告発令判断基準と避難勧告種別について検討を行った。

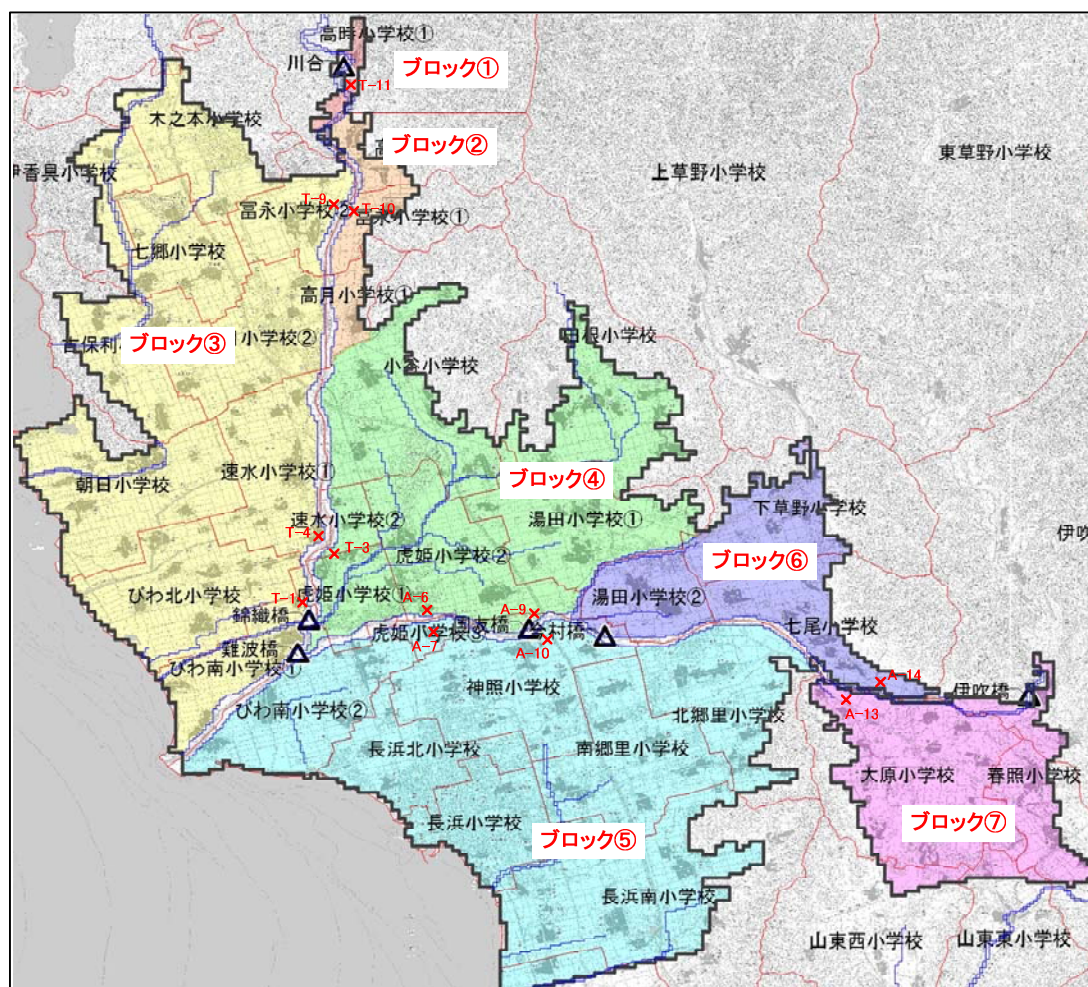


図 3.4.12 避難勧告発令の基本単位

避難勧告の発令判断指標としては、当該エリアの属する氾濫ブロックに影響を及ぼす河川における「氾濫警戒情報」を基本として設定したが、以下に示すケース①～③においては例外として設定した。

- ①洪水予報河川および水位周知河川に指定されていないが洪水氾濫による影響が大きい。さらに、水位観測所を有している田川ならびに草野川の想定氾濫エリアについて、「各々の水位観測所での氾濫注意水位を超過し、更なる上昇が予想されるとき」を避難勧告の発令判断基準として設定した。

- ②河川氾濫前において、水路からの氾濫等により歩行による避難が困難と想定され、かつ洪水氾濫による人的被害が想定されるエリアについては、早期の避難行動を促す必要があることから、「氾濫警戒情報」の前段階の判断基準として、「氾濫注意情報」を設定した。
- ③虎姫小学校区①については、姉川・高時川氾濫前に田川からの氾濫が発生し、一部集落に床上浸水が生じる可能性が高いことから、「氾濫警戒情報」の前段階の判断基準として、「氾濫注意情報」を設定した。

一方で、避難勧告を発令する際に、その逼迫度に重み付けをして住民に伝わるようにするため、地先の危険度の程度に応じた付加情報を以下の考えで設定した。

- ・当該エリアにおいて、洪水氾濫による家屋水没あるいは家屋流出の危険性の高い区域が生じ、かつその区域が集落内に及ぶと想定される場合には、避難勧告発令の際の付加情報として「避難指示情報」を設定した。
- ・洪水氾濫による床上浸水の危険性の高い区域が生じ、かつその区域が集落内に及ぶと想定される場合には、避難勧告発令の際の付加情報として「避難促進情報」を設定した。
- ・洪水氾濫により人的被害をもたらすエリアが生じると想定されるも、その区域が集落内に及ばないと想定される場合には、避難勧告発令の際の付加情報として「注意喚起情報」を設定した。

以上の結果から、避難勧告等の発令基準と付加的な情報について地区毎に設定した。表 3.4.5 には、氾濫ブロックと小学校区での人的被害指標と歩行による避難が困難となる時間的目安を示している。これの氾濫情報に基づき、滋賀県から発令される洪水氾濫情報や支川の水位による避難勧告の発令基準を整理したものである。これらの避難勧告には、さらに上記の危険度に応じた付加的な情報についても記載している。また、一時避難が可能な学区もあることから、逃げ遅れた際に2階以上の高いところに避難することも可能であることを整理した。これにより、地方自治体は、河川水位を見て、優先的に避難させる学区を特定し、対応することが時間的な経過の中で選定できるものと考えられる。

表 3.4.5 学区別の避難勧告等の発令基準

地区・ブロック	小学校区	危険箇所と関連 付く水位観測所	人的被害指標		一時避難 可能性	避難勧告発令目安～ 住民避難完了目安～ 間の歩行困難状況※	避難勧告発令判断基準	避難勧告種別	備考
			家屋水没	床上浸水					
氾 濫 ブロック	ブロック① 高時小学校区①	T-11 川 合	●	●	不可能	困難度 低	氾濫警戒情報 (高時川)	避難勧告(避難指示情報)	家屋水没：水之本町川合 (高時川)
	ブロック② 高時小学校区①		○	○	可能(屋内)	困難度 低	氾濫警戒情報 (高時川)	避難勧告(避難指示情報)	家屋流出：水之本町古橋 (中ノ谷川)
	ブロック③ 高時小学校区①		○	○	可能(2階)	困難度 低	氾濫警戒情報 (高時川)	避難勧告(注意喚起情報)	
	伊弉具小学校区	T-9 川 合	○	○	可能(2階)	困難度 低	氾濫警戒情報 (高時川)	避難勧告(避難指示情報)	
	木之本小学校区		○	○	可能(2階)	困難度 低	氾濫警戒情報 (高時川)	避難勧告(避難指示情報)	
	七郷小学校区		○	○	可能(2階)	困難度 低	氾濫警戒情報 (高時川)	避難勧告(避難指示情報)	
	富永小学校区②		○	○	可能(2階)	困難度 低	氾濫警戒情報 (高時川)	避難勧告(避難指示情報)	
	高月小学校区②		○	○	可能(2階)	困難度 低	氾濫警戒情報 (高時川)	避難勧告(避難指示情報)	
	古保利小学校区		○	○	可能(屋内)	困難度 低	氾濫警戒情報 (高時川)	避難勧告(注意喚起情報)	
	朝日小学校区		○	○	可能(2階)	困難度 低	氾濫警戒情報 (高時川)	避難勧告(注意喚起情報)	
	速水小学校区①		○	○	不可能	困難度 低	氾濫警戒情報 (高時川)	避難勧告(避難指示情報)	家屋流出：海北町馬渡 (高時川)
	びわ湖小学校区	T-4 川 合、総織橋	○	○	可能(2階)	困難度 低	氾濫警戒情報 (高時川・総川)	避難勧告(避難指示情報)	
氾 濫 ブロック④	虎姫小学校区①	T-3 A-6 A-9 川 合、国友橋 月々瀬 (田 川)	●	●	不可能	床上浸水 (新垣町)	氾濫警戒情報 (総川・高時川) 月々瀬 (田 川) において「はん濫注意水位」 を超過し、更なる上昇が見込まれるとき	(C) 避難勧告(避難指示情報) (A) 避難勧告(避難指示情報)	家屋水没：月々瀬町、新垣町、長田町、 松ノ木 (総川、高時川、田川)
	虎姫小学校区②		●	●	不可能	困難度 低	氾濫警戒情報 (総川・高時川) 月々瀬 (田 川) において「はん濫注意水位」 を超過し、更なる上昇が見込まれるとき	(A) 避難勧告(避難指示情報)	家屋流出：大井町 (総川)
	速水小学校区②		○	○	可能(2階)	困難度 低	氾濫警戒情報 (高時川) 月々瀬 (田 川) において「はん濫注意水位」 を超過し、更なる上昇が見込まれるとき	(A) 避難勧告(避難指示情報)	時川、田川
	小谷小学校区	T-10 川 合	○	○	可能(2階)	困難度 低	氾濫警戒情報 (高時川)	避難勧告(避難指示情報)	T-10 からの氾濫流が山田川を越えて 当区エリアに到達する可能性有り
	田根小学校区		○	○	可能(2階)	困難度 低	氾濫警戒情報 (高時川)	避難勧告(避難指示情報)	
	湯田小学校区①		○	○	不可能	困難度 低	氾濫警戒情報 (高時川)	避難勧告(避難指示情報)	家屋流出：内保町 (草野川)
	神照小学校区	A-10 国友橋	○	○	不可能	困難度 低	氾濫警戒情報 (総川)	避難勧告(避難指示情報)	家屋流出：国友町、泉町 (総川)
	虎姫小学校区③		○	○	不可能	困難度 低	氾濫警戒情報 (総川)	避難勧告(避難指示情報)	家屋流出：大井町 (黒道 263 号)
	びわ湖小学校区②		○	○	可能(2階)	困難度 低	氾濫警戒情報 (総川)	避難勧告(避難指示情報)	
	長北小学校区		○	○	可能(2階)	困難度 低	氾濫警戒情報 (総川)	避難勧告(避難指示情報)	
	長北小学校区		○	○	可能(2階)	困難度 低	氾濫警戒情報 (総川)	避難勧告(避難指示情報)	
氾 濫 ブロック⑤	北郷南小学校区	A-13 伊吹橋	○	○	可能(2階)	困難度 低	氾濫警戒情報 (総川)	避難勧告(避難指示情報)	
	北郷里小学校区		○	○	可能(2階)	困難度 低	氾濫警戒情報 (総川)	避難勧告(避難指示情報)	
	南郷里小学校区		○	○	可能(2階)	困難度 低	氾濫警戒情報 (総川)	避難勧告(避難指示情報)	
	湯田小学校区②	A-13 伊吹橋	○	○	可能(2階)	困難度 低	氾濫警戒情報 (総川)	避難勧告(避難指示情報)	
	七郷小学校区		○	○	可能(2階)	困難度 低	氾濫警戒情報 (総川)	避難勧告(避難指示情報)	
	七郷小学校区		○	○	可能(2階)	困難度 低	氾濫警戒情報 (総川)	避難勧告(避難指示情報)	
	大原小学校区	A-13 伊吹橋	○	○	不可能	困難度 低	氾濫警戒情報 (総川)	避難勧告(避難指示情報)	家屋水没：杉原田 (総川、田川)
	大原小学校区		○	○	不可能	困難度 低	氾濫警戒情報 (総川)	避難勧告(避難指示情報)	
	大原小学校区		○	○	不可能	困難度 低	氾濫警戒情報 (総川)	避難勧告(避難指示情報)	
	大原小学校区		○	○	不可能	困難度 低	氾濫警戒情報 (総川)	避難勧告(避難指示情報)	

区附近が立ち退き避難を必要とし、その下流においても同様の状況であることが想定される。また、図 3.4.18 に示す姉川上流域で氾濫警戒情報が発令されると、大原小学校区で立ち退き避難を必要となることがわかる。

図 3.4.19 には、支川田川の水位が氾濫注意水位を超過し、さらに上昇することが見込まれるときには、虎姫小学校区で立ち退き避難が必要となる。また、図 3.4.19 には姉川支川草野川においても同様に氾濫注意水位に到達しさらなる上昇が見込まれるときには、立ち退き避難が必要となることがわかる。このような整理をすることで地方自治体は、地区別に避難の規模を推定でき、地区毎に適切な指示や対応が執れることに繋がることを期待できる。

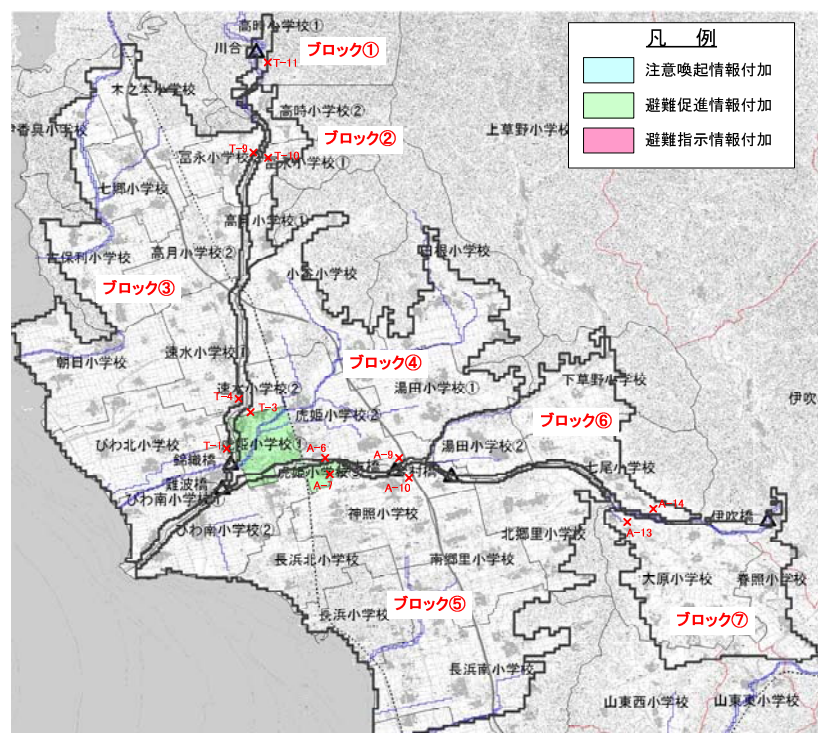


図 3.4.14 姉川を対象に洪水予報（氾濫注意情報）が発令された時点における避難勧告の発令対象学区

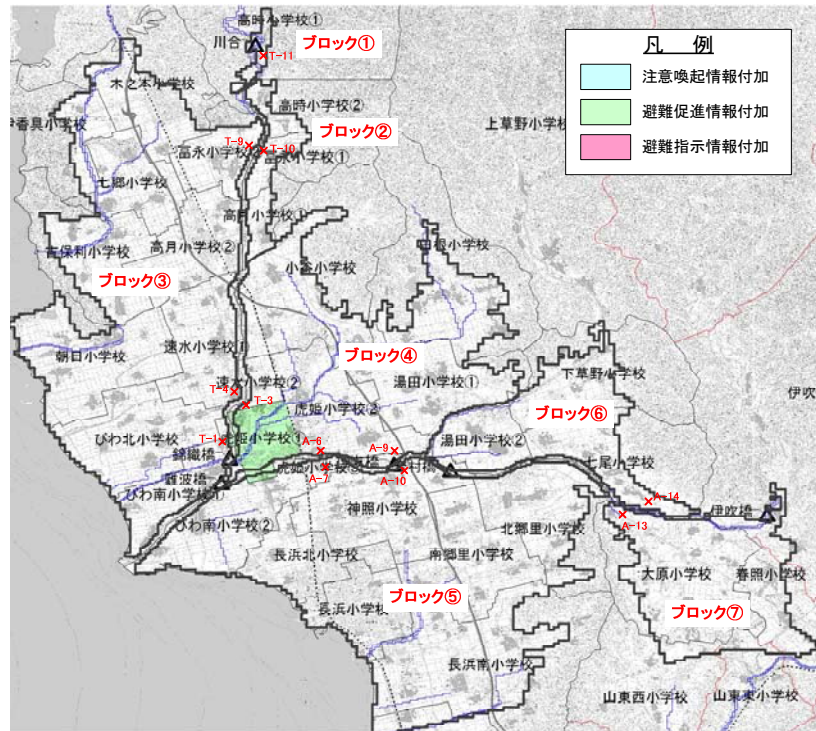


図 3.4.15 高時川を対象に洪水予報（氾濫注意情報）が発令された時点における避難難勧告の発令対象学区

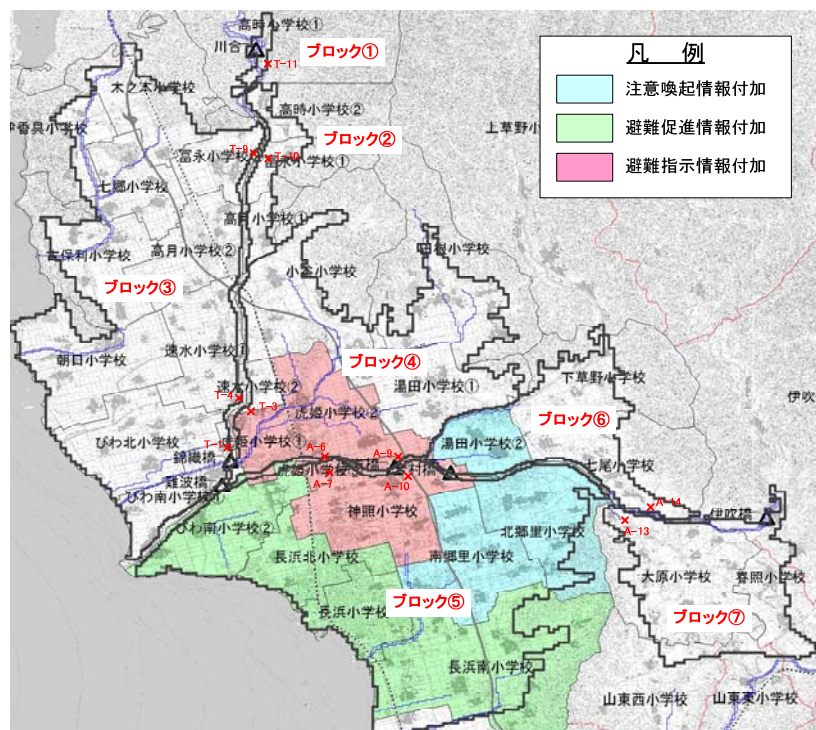


図 3.4.16 姉川を対象に洪水予報（氾濫警戒情報）が発令された時点における避難難勧告の発令対象学区

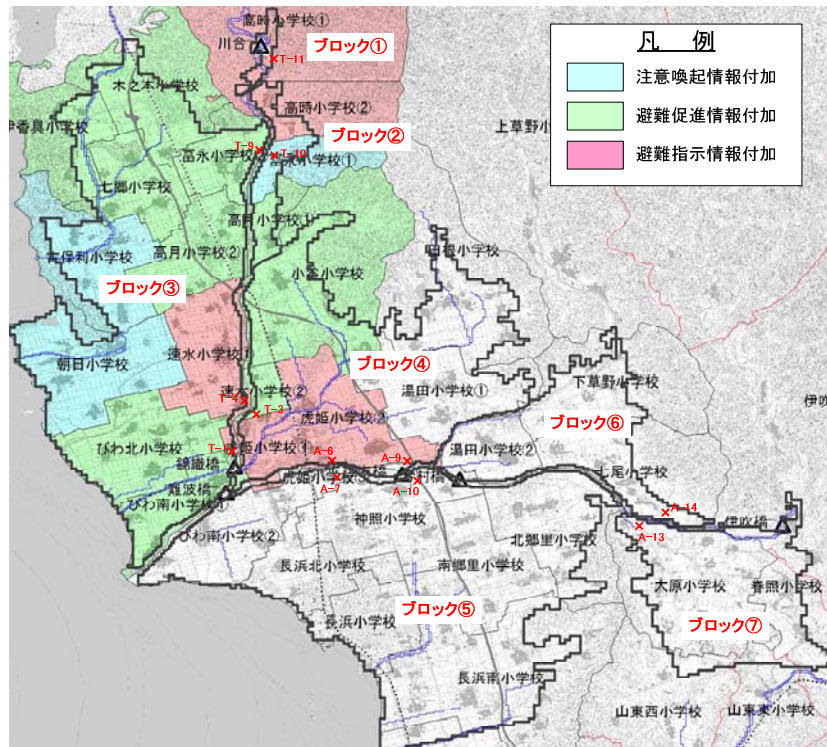


図 3.4.17 高時川を対象に洪水予報（氾濫警戒情報）が発令された時点における避難難勧告の発令対象学区

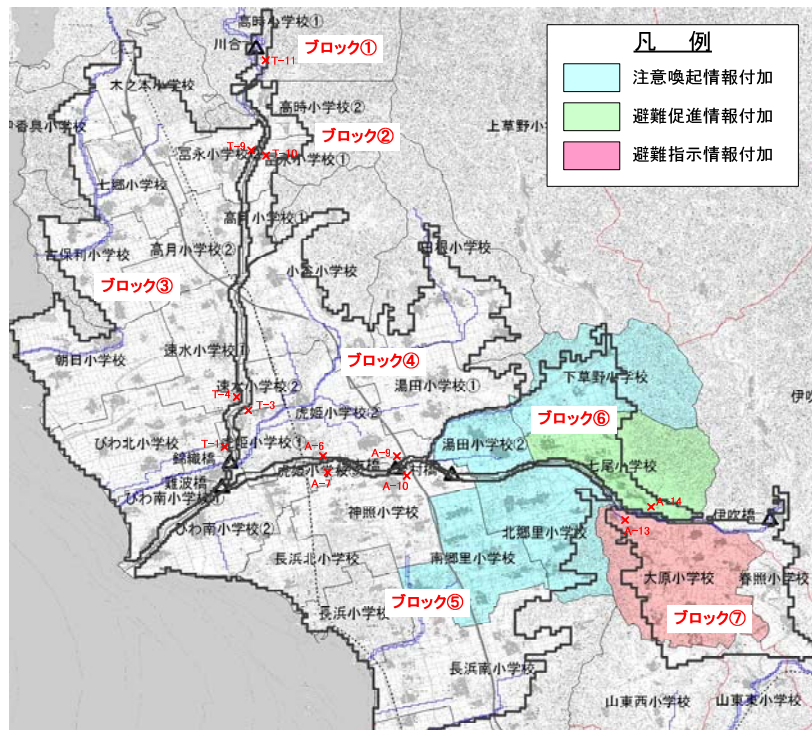


図 3.4.18 姉川上流域を対象に洪水予報（氾濫警戒情報）が発令された時点における避難難勧告の発令対象学区

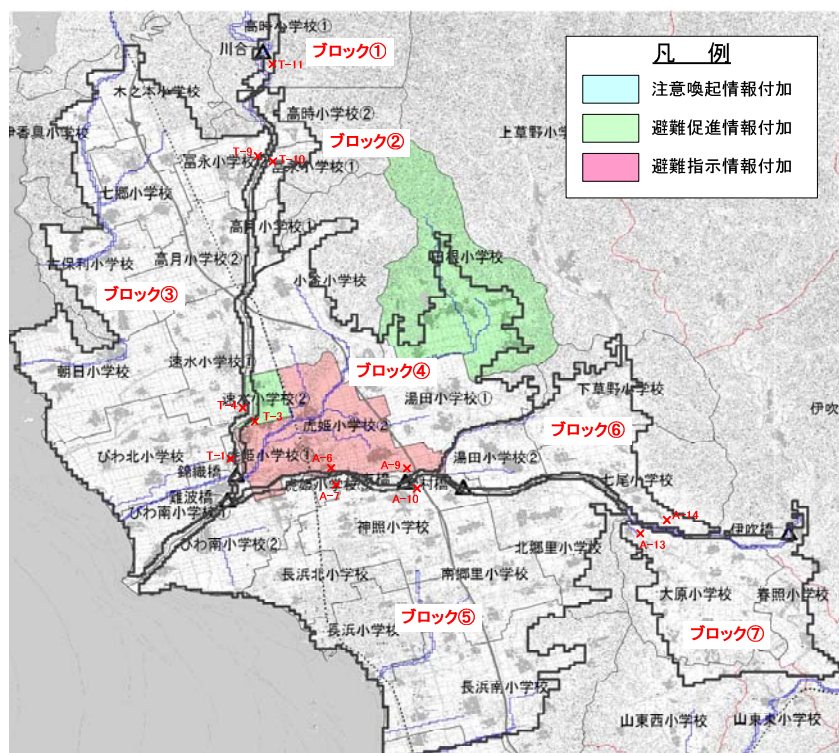


図 3.4.19 月ヶ瀬（田川）において「はん濫注意水位」を超過し、更なる上昇が見込まれる時点における避難難勧告の発令対象学区

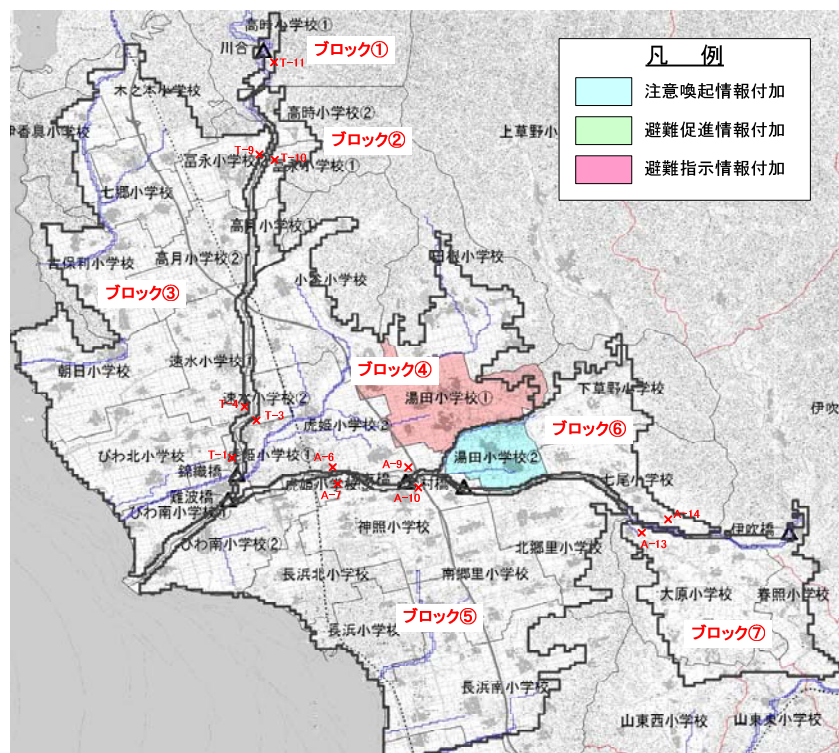


図 3.4.20 大門橋（草野川）において「はん濫注意水位」を超過し、更なる上昇が見込まれる時点における避難難勧告の発令対象学区

3.5 おわりに

国・都道府県が発令する氾濫情報に対して、地方自治体が発令することができない現状は、洪水氾濫から住民を守ることができないばかりでなく、リスクの高い地域の住民の命を守れないという事態を引き起こす可能性がある。本章の背景である地方自治体の問題として、避難準備情報、避難勧告・指示を発令できない理由として、空振りをおそれていること、さらには、もし発令する場合、対象を広範囲に発令することとなり、現状の氾濫とはかけ離れたものとなるといった課題がある。

本章では、このような地方自治体の抱える問題に対して、氾濫原のリスクを評価した上で、人的被害が発生する可能性が高い地区を抽出し、洪水予報河川、水位周知河川といった法的に指定されている観測水位に応じた避難勧告等の発令基準を検討した。

本章の結論として、以下のように要約する。

- ・住民がリスクを受容しやすいと考えられる経験的な危険な箇所を特定するとともに、現状の水位観測所との水理関係を明確にすることで、発令基準と連動した住民自身が判断できる避難の目安を（経験知）を設定できることを示した。
- ・内外水氾濫を考慮した水理モデルを用いた結果は、従来の外水氾濫しか考慮していない結果に基づく避難の判断基準では、逃げ遅れる可能性がある地区があることを示した。これは、堤内地の内水氾濫によって外水氾濫よりも先に浸水し、避難時の歩行が困難となる可能性がある地区が存在するためである。
- ・地方自治体、まず人的被害が発生する可能性が高い地区に対して、避難勧告を発令する必要があることが示された。その際に、内水氾濫による避難が困難になる時間を考慮することが重要である。これらを地区毎に設定した避難勧告等の発令基準を示した。さらに、避難判断水位に到達し、氾濫注意情報が発令される時から氾濫危険水位に達するまでの時間内に避難が完了するかどうかを評価する必要があると考え、浸水の深刻さに応じた避難勧告に付加する避難を促す情報を提案した。
- ・実際の洪水では、対象とした姉川・高時川に加えて水位周知河川であり、河川整備水準が姉川・高時川よりも低い支川田川、草野川の状況にも対応した避難勧告の発令地区とその提供する情報について示した。
- ・本章で示した避難勧告等の発令基準によれば、本章の背景として指摘した避難勧告・指示の発令を躊躇することや、空振りを恐れて発令しないことといった行政上の防災体制の課題を解決することができるものと考えられる。しかし、対象とした姉川・高時川流域の氾濫原においては、避難勧告等の発令単位が小学校区としているため、校区内の各自治会に対する避難方法を地域防災計画において規定していないため、今後別途議論の余地があるものと考えられる。
- ・今後、今回設定した基準に対して、図上訓練での確認、地区別避難計画の作成など、各自治会の事情に基づく防災体制について検討していくことが必要である。また、人的被害が発生しないために、実効性ある避難行動につなげていくこと取り組みを推進していく予定である。

参考文献

- 1) 矢守克也：災害情報のダブル・バインド，災害情報，No.7，pp.28-33，2009.
- 2) 大雨災害における避難のあり方等検討会：大雨災害における避難のあり方等検討会報告書，内閣府・総務省・厚生労働省・国土交通省・気象庁，2010.
- 3) 滋賀県：滋賀県流域治水基本方針― 水害から命を守る総合的な治水を目指して―，2012.3
- 4) 花房大輔，橋本将明，佐々木昌俊，田中耕司，西居直史，中島敏雄，饗庭啓良：避難勧告・指示に資するきめ細かい河川情報に関する研究，安全問題研究論文集，Vol.5，pp.211-216，2010.
- 5) 児玉真・木下猛・片田敏孝：避難準備情報の導入に伴う避難情報の段階的発令とその住民受容に関する研究，災害情報 No.6，pp.51-60，2008
- 6) 片田敏孝・桑沢敬行：ダム機能を考慮した下流域の洪水氾濫対策のためのシミュレーション・システムの開発，土木学会論文集 D Vol.65，No.3，pp.280-292，2009.7.
- 7) 児玉真・本間基寛・片田敏孝・若田部純一：豪雨災害関連情報の充実化とその下での自治体対応にみる現状と課題，災害情報 No.7，pp.75-83，2009
- 8) 瀧健太郎，松田哲裕，鵜飼絵美，藤井悟，景山健彦，江頭進治：中小河川群の氾濫域における超過洪水を考慮した減災対策の評価方法に関する研究，河川技術論文集，第15巻，pp.49-54，2009.
- 9) 岩佐義郎，井上和也，水鳥雅文：氾濫水の水利の数値解析法，京都大学防災研究所年報，第23号，B-2，pp.305-317，1980.
- 10) 栗城稔，末次忠司，海野仁，田中義人，小林裕明：氾濫シミュレーション・マニュアル（案），土木研究所資料，第3400号，1996.
- 11) 佐藤智，今村文彦，首藤伸夫：洪水氾濫の数値解析および家屋被害について―8610号台風による吉田川の場合―，水理講演会論文集，第33巻，pp.331-336，1989.
- 12) 河田恵昭，中川一：三隅川の洪水災害―洪水氾濫と家屋の被害―，京都大学防災研究所年報，第27号B-2，1984.
- 13) 利根川研究会（須賀堯三監修）：利根川の洪水，1995.

第4章 中小河川群の氾濫原における地区別避難判断基準に関する研究

4.1 はじめに

近年、直轄河川のみならず指定河川においても洪水予報河川、水位情報周知河川に指定し、氾濫の恐れのある流域住民への避難勧告・指示の発令を目的に避難判断水位、氾濫危険水位が設定されている。洪水予報河川に目を向けると比較的大きな流域を要する河川が対象になっており、中小河川において設定されているケースはほとんどない。この理由として、堤内地の資産の状況も踏まえると、水位監視によるソフト対策の優先順位を下げざるを得ない状況にある。さらには、洪水到達時間が短く、流域面積も小さいため、行政側から水位情報を発しても、避難判断に必要な時間的余裕がないといった問題もある。

このように、中小河川では、水文水理の観測体制が十分でないため、千種川水系佐用川支川幕山川で起きた事例¹⁾のように、河川管理者、住民ともに、河川やその周辺の状況を把握できないまま、避難時に住民が氾濫流にさらわれて命を落としている。兵庫県都賀川流域で発生したゲリラ豪雨のような強い雨による急激な増水²⁾や千種川流域の局地的な集中豪雨による中小河川の氾濫は、最近多く見られ、中小河川を含む流域全体での内外水氾濫による甚大な被害が発生する可能性はより高いと言える。

洪水発生に伴う氾濫に対する「備え」として、行政による住民への防災教育が活発化する中で、中小河川を抱える河川管理者・地方自治体や氾濫原の住民は、洪水が発生したら避難を開始する具体的な判断基準がないために、避難勧告が発令できない、あるいは避難をいつしたらいいのか分からず、住民は避難に対してより行政に依存する体質が強くなるといった防災上の課題³⁾が解決していない。既に3章において指摘したように、このような防災上の課題に対して、内閣府等が公表した「大雨災害における避難のあり方等検討会報告書」⁴⁾では、地方自治体に対して地域特性に応じた早期避難、屋外避難の回避、垂直避難といった選択もあることを示している。

このような洪水到達時間が短い河川やその堤内地に対する避難勧告等の発令や住民独自に避難判断ができる基準のあり方について、水理的な解析に基づいた研究は行われていない。本章では、滋賀県高島市内の中小河川群と堤内地を対象に、内外水氾濫モデルを用いて、内外水氾濫の特性を整理し、対象とする圏域の避難の基本的な考え方について提示した。具体的な避難判断基準を検討するために、滋賀県高島市内における洪水時に避難が必要な地区を対象に、氾濫現象のシナリオを作成し、地区内の避難判断基準の設定方法について検討する。

4.2 氾濫解析

4.2.1 水理解析モデル

本章では、瀧ら⁵⁾が開発した氾濫流を総合的に解析できる数値計算モデルを適用し、氾濫原の水理諸量を算定した。

このモデルの特徴は、流出域、河道域および氾濫域までの一連の水理現象を統合的に扱えることである。流出域においては、合成合理式による流出解析モデルを適用し、流出量のハイドログラフを求め、時間遅れを考慮して河道上流端に与えた。河道域の流れの解析には、現況河道縦横断面データが存在する区間を対象に、一次元不定流解析モデルを適用した⁶⁾。さらに、氾濫流については、平面二次元氾濫解析モデルを適用した⁶⁾。

氾濫解析、氾濫モデルの詳細な計算条件は、表 4.2.1、表 4.2.2および表 4.2.3の通りである。これらは、瀧ら³⁾の計算条件に基本的に同じである。

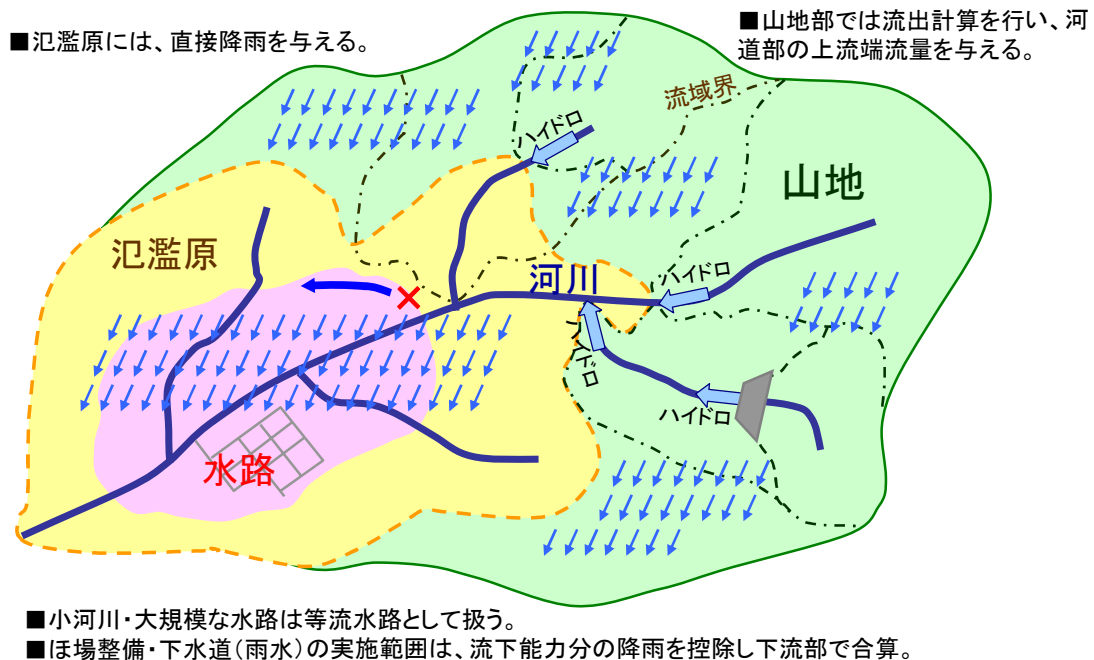


図 4.2.1 統合型水理モデルの概念図

4.2.2 外力の設定

滋賀県降雨強度式を用いて、降雨継続時間を24時間とした中央集中型を採用した。モデル降雨を中央集中型で作成することにより、流域面積（あるいは洪水の到達時間）の異なる河川・水路に対して同規模の外力を与えることが可能となる。評価対象外力としては、瀧ら⁵⁾が用いた図4.2.2に示す中央集中型のモデル降雨に加えて、同一降雨として10mm/hr～60mm/hrが6時間継続したモデル降雨を用いた。

中央集中型のモデル降雨は、シャープな降雨波形であり、ゲリラ豪雨や台風性の降雨に見られる特性を有している。また、確率規模別で総雨量と浸水の関係性を把握する上で有効である。一方で、中央集中型のモデル降雨を用いた内外水氾濫解析での河川水位の変化や浸水状況は、1つの降雨波形に依存することが考えられるため、大抵の降雨波形での氾濫の特性を把握するために、矩形型のモデル降雨を用いた。さらに、比較的情報の乏しい中小河川において、どんな降雨・氾濫現象が発生しても、地方自治体が避難準備情報、避難勧告および指示の判断ができる基準を作成することができると想定した。

4.2.3 破堤条件

本検討では、上記の目的に対して、地先の安全性を概観するために、以下の2つのケースを設定した。破堤幅や破堤時間等は栗城ら⁸⁾の手法を用いた。

- ①河道内の計算水位が堤防天端高を越えた時点で破堤が始まると仮定
- ②河道内の計算水位によらず破堤しないと仮定

なお、特に避難開始時に影響する内水の状況を把握するため、敢えて、河道内からの越水・破堤はさせない計算を参考までに実施した。

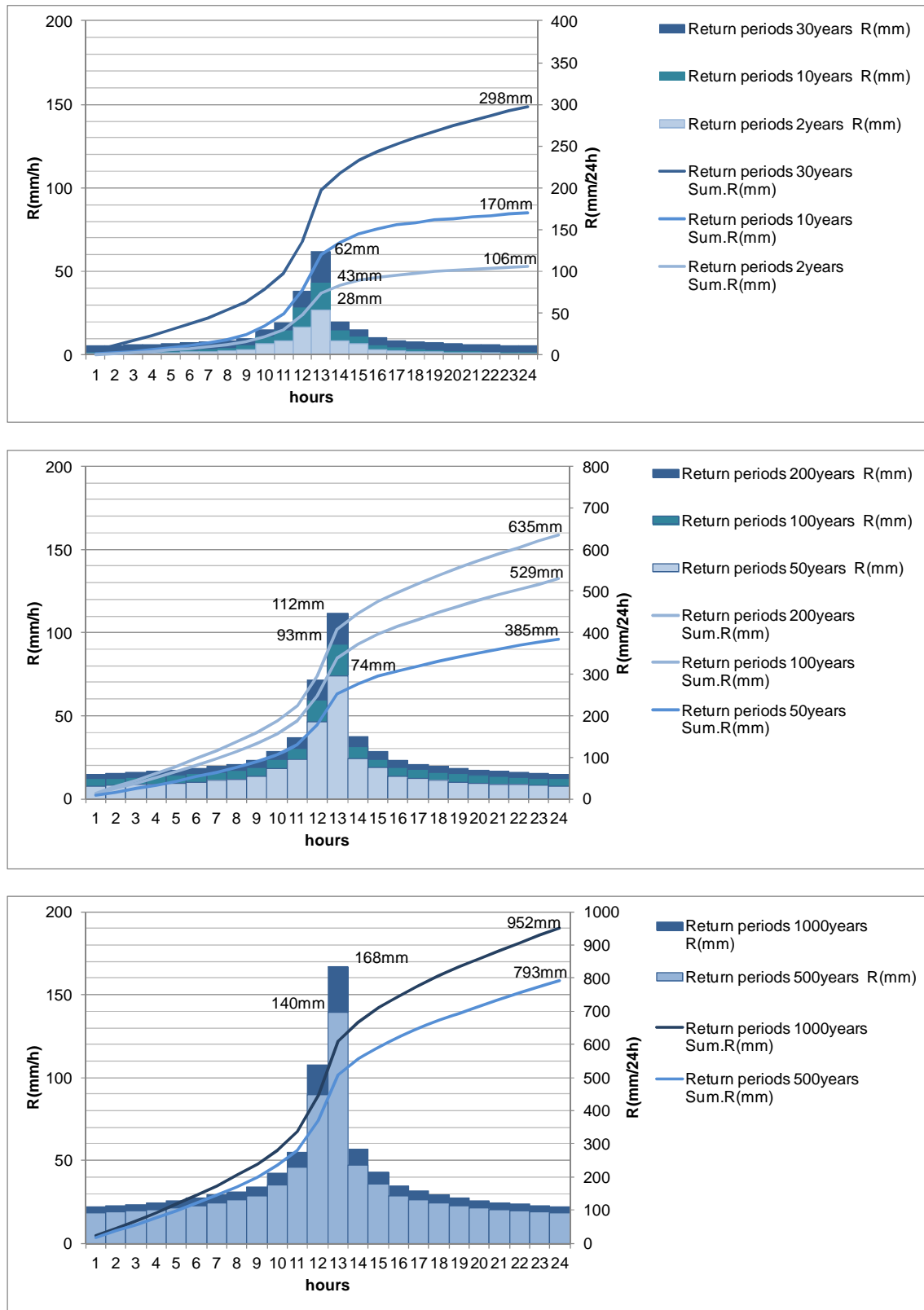


図 4.2.2 モデル降雨波形

表 4.2.1 計算条件の一覧

条 件		解析条件	
解析モデル	流出	山地部からの流出量は、計画ハイエトから流量を合成合理式により算出する流出解析モデルを適用する。	
	河道	洪水の伝搬は、一次元不定流計算手法により追跡する。 対象河川：滋賀県内の法河川、支川は独立させ、本川水位を下流端条件として一次元不定流で解析する。伏せ越しの部分はスロットモデルにより水頭を表現する。	
	氾濫原	平面二次元不定流計算手法による氾濫解析 約50m×50m(3次メッシュを縦横ともに1/20分割) 解析対象範囲はH18年近畿地方整備局管内河川航空レーザ測量業務の解析ならびにH15年琵琶湖沿岸航空レーザ測量業務において測量された滋賀県内の氾濫原の範囲としている。	
	水路	氾濫流の流下・伝播に影響を与える規模の水路は、等流水路モデルとしてメッシュ間の疎通量を与える。	
	排水整備範囲	計画的に雨水排水施設が整備されたエリアについては、計画流出高相当が当該メッシュより排水され近隣の水路・河川に排水させる。	
	水量交換	河道と氾濫原の間、背割り堤の区間の水量交換は越流公式で評価する。	
	流量条件	上流端条件	山地部からの流出は、河川上流端に流出解析ハイドロを与える。
モデル化した河川上流端以外の山地部からの流出は、河川へ合流もしくは水路モデルが設置される境界メッシュに、流出解析で算出されるハイドロを与える			
ダム		現況もしくは計画される洪水調節施設について、ただし書き操作を想定して洪水調節施設を実施されるものとする。	
内水加算量		河道流量に内水排除流量(支川との水位差相当、等流水路能力、施設能力・一定値)を加算する。	
河道		河道断面	現況河道ならびに一部圏域で河川整備計画断面を対象とする。 河道内樹木群による阻害を見込まない。
		粗度係数	全計等に記載がある粗度、その他は $n=0.030$ を与える。
		河道H-Q式	各支川の出発水位の変動や破堤による河道内の水位変動を考慮するため、水位は不等流計算による H-Q 式によって変換しないものとする。
		分合流	主要河川の分合流点は、合流点の水位が同じとみなし文頭流点の流量収支を整合させる。 その他、支川合流点は、本川の水位を出発水位として与える。
その他		水路	1/2,500 地形図から読み取れる幅ならびに現地調査から得られる水路幅と水深の関係から得られる水深、水路が貫流するメッシュ間の勾配から等流水路の疎通能力を与える。
		排水施設整備範囲	圃場整備については計画雨水量を、下水道雨水排水施設整備については、計画される流出量、流入域から算定される流出高(排水量/流入エリア)を雨水排水施設整備範囲のメッシュに与える。
条件降雨	河道域－氾濫域	山地部(流出域)に設定されない河道域－氾濫域に対して、計画ハイエトをメッシュに直接あたえる。流出率は、当該メッシュが浸水するまで、土地利用に応じた流出率(合理式に適用される値)を適用する。	
水位条件	河川出発水位	県下河川の高水計画時(施設計画)に用いられる $B.S.L.+0.4m$ を一律与える ($B.S.L.0.0m=T.P.+84.371m$)。	
	内湖水位	琵琶湖水位と同一とし、県下河川の高水計画時(施設計画)に用いられる $B.S.L.+0.4m$ を一律与える ($B.S.L.=T.P.+84.371m$)。	
排水機場		琵琶湖の樋門、排水機場における操作基準水位は、概ね $B.S.L.+0.4m$ に近いので、樋門は開放、排水機場は稼働させず、自然流下とする。	
水門・樋門・樋管		水路モデルについては、本川水位上昇により、堤内地側へ逆流しない。	

表 4.2.2 計算条件の一覧

条 件		解析条件
越流条件	越水箇所	最大流下能力（定義される堤防護岸高および隣接するメッシュ地盤高の高い方）を越えた地点を越水させる．
	越水開始水位	最大流下能力（定義される堤防護岸高および隣接するメッシュ地盤高の高い方）を越えた時点で越水開始とする．
	越水幅	越水幅は断面が設定されるメッシュ幅を基本とし，後述の破堤幅が定義される場合は直下流破堤候補点までの距離の小さい方を採用する．
	越流量	横越流公式により算出する ⁷⁾ ． $\cdot I > 1/12,000 \quad \frac{Q}{Q_0} = \cos(155 - 38\ln(1/I))$ $\cdot I \leq 1/12,000 \quad \frac{Q}{Q_0} = 1$ $Q_0 : \text{本間正面越流公式の } Q(\text{後述})$
破堤条件	破堤地点	破堤開始流量に達する断面（最短距離 100m ピッチ）
	破堤幅	氾濫シミュレーションマニュアル(案)[H8.2]の土研式で算出した． $\cdot \text{合流点付近} : y = 2.0(\ln x)^{3.8} + 77 \quad y : \text{破堤幅(m)}$ $\cdot \text{合流点付近以外} : y = 1.6(\ln x)^{3.8} + 62 \quad x : \text{川幅(m)}$
	破堤敷高	高水敷高と堤内地盤高のいずれか高い方．
	破堤開始水位	河道水位が最大流下能力を超えた時点で破堤．
	破堤の時間進行	破堤敷高：破堤後，瞬時に破堤敷高まで削れると想定． 破堤幅：破堤後瞬時に最終破堤幅の 1/2 が破堤し，その後 1 時間かけて最終破堤幅まで拡大する(拡大速度一定)．
	氾濫流量	本間の正面越流公式による流量を Q_0 とし，河床勾配を I としたうえで，以下の式で氾濫流量 Q を与える．ただし， \cos のカッコ内の単位は $^{\circ}$ である． 破堤に伴う氾濫流量 Q $I > 1/1580 \quad \frac{Q}{Q_0} = (0.14 + 0.19\ln(1/I))\cos(48 - 15\ln(1/I))$ $1/33600 < I \leq 1/1580 \quad \frac{Q}{Q_0} = (0.14 + 0.19\ln(1/I))$ $1/33600 \geq I \quad \frac{Q}{Q_0} = 1$ 本間の正面越流公式(氾濫シミュレーションマニュアル(案)[H8.2]の式)は以下の通りである． $h_2/h_1 < 2/3 \quad Q_0 = 0.35Bh_1\sqrt{2gh_1}$ $h_2/h_1 \geq 2/3 \quad Q_0 = 0.91Bh_2\sqrt{2g(h_1 - h_2)}$ $h_1 : \text{破堤敷高から見て高い方の水位(m)} \quad h_2 : \text{破堤敷高から見て低い方の水位(m)}$

表 4.2.3 計算条件の一覧

条件		解析条件
氾濫原	メッシュ地盤高	レーザープロファイラデータを元に整理した 50m メッシュでの平均地盤高データを用いる。
	氾濫原粗度	氾濫シミュレーションマニュアル(案)[H8.2]による底面粗度と水深と建物占有率による関数で表す。建物占有率の上限は 80%
	連続盛土構造物	平均地盤高からの比高 0.5m 以上の連続盛土施設を考慮。 道路、鉄道、河川堤防（河川モデルを除く）を対象とする。 盛土構造物の越流量は、本間の正面越流公式で越流量を算出する。
	カルバート	カルバートからの流出を取り扱う。 ・盛土に対する全開口部をメッシュ単位で矩形にモデル化する。 ・氾濫シミュレーションマニュアル(案)[H8.2]の土研式で流出量を算出する。
氾濫戻し		越水による氾濫戻しを考慮する。 ・氾濫原水位が現況堤防高を越えた時点で、氾濫原水位と河道水位とを考慮し、正面越流公式で越水量を算出する（各メッシュ 1 断面以上）。
		断面は各メッシュに少なくとも 1 断面が設定されるよう内挿する。
計画降雨条件		以下の降雨波形を用いた。 ・ 10,20,30,50,100,200,500,1000 年確率の中央集中モデルで与える。 ・ 一律 10mm/hr～60 mm/hr が 6 時間継続したモデル波形を与える。
		表 4.2.4 水理計算の外力規模
		再現期間
		備考
		2年
		10年
		30年, 50年
		100年
		200年
		500年, 1000年
時系列の浸水深、流速データ		破堤ケース（河道水位が最大流下能力に達した地点で破堤させたケース）により一意的に設定

4.3 対象流域の氾濫特性

4.3.1 対象流域

本章で対象にした流域は、図 4.3.1に示す滋賀県高島市を流れる天川、石田川、上郷川および境川の4つの河川流域とこれらの堤内地である。いずれの河川も天井河川であり、河川改修により河床掘削、築堤により治水対策が暫定的ではあるが、現在継続的に改修が実施されている。これらの4河川の流域面積は75km²であり、氾濫原の面積は17km²である。

対象としている河川での災害履歴は、昭和40年9月洪水以後の被害はない。しかしながら、堤内地での内水被害については、現在確認されているのは上郷川中流部で平成11年に発生している。また、内水氾濫で頻繁に浸水による通行止め等が発生している地区がある。

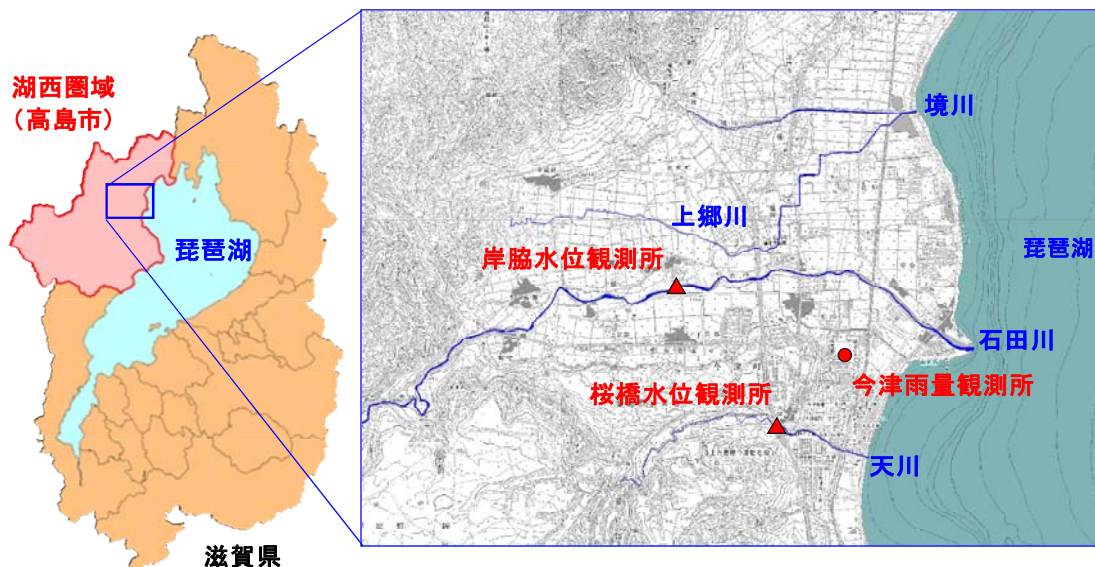


図 4.3.1 流域概要図

4.3.2 氾濫特性の把握

対象となる圏域での避難判断基準を考察していく上で、圏域内での避難行動の判断に影響を与える氾濫特性として、以下の指標⁹⁾で考察した。

- ・床下浸水、道路冠水（～0.5m未満）
- ・床上浸水（0.5m以上）
- ・水中での歩行困難（小学校1年生の身長を基準¹⁰⁾）
- ・家屋が流失する恐れのある流体力（2.5m³/s²以上¹¹⁾）
- ・家屋が水没する恐れのある浸水深（3.0m以上¹²⁾）

先に示した表 4.2.1～表 4.2.3に示す条件で、4河川の外水氾濫、それらに挟まれる堤内地の内水氾濫について解析を行った。

まず、内外水氾濫による特性を把握するために、越水・破堤あり、越水・破堤無しならびに越水無し・破堤無しで内水氾濫のみの比較を行った。これらの結果を、図 4.3.2

および図 4.3.3に示す。これらは、床上浸水、歩行困難、家屋水没、家屋流失という指標を下に確率規模毎における各メッシュの浸水頻度を整理したものである。

これによれば、床上浸水・歩行困難になる状態は、破堤の有無、内水に関わらず、ほぼ同じ範囲で同じ頻度で発生することが理解できる。一方で、家屋水没の危険性ある範囲は、ごく限られた範囲であるとともに、石田川沿いの一部については、越水・破堤によって危険性が生じる地区があることがわかる。また、木造家屋流出については、石田川と江郷川（えごかわ）沿いに発生している。これらから浸水頻度と氾濫によるリスクの形態の違いに大きな差異はないものと考えられるが、避難を想定する場合、各メッシュの危険性を評価する必要があるものと考えられる。

そこで、越水・破堤ありの条件による計算結果から、全メッシュと家屋メッシュに対する発生頻度分布を整理したものを図4.3.4に示す。これによると、以下の特徴が明らかとなった。

- ・床上浸水は、広範囲で1/10以下の高頻度で発生する可能性がある。
- ・歩行困難が推測されている地区は、ほぼ床上浸水が発生する地区と一致し、その発生要因は他の内水氾濫の流入や外水氾濫によるものである。
- ・浸水深が3mを超過し、家屋が水没する恐れはない。
- ・流体力が $2.5\text{m}^3/\text{s}^2$ を超え、家屋が流失するような箇所は石田川沿いと天川下流部の低平地であり、1/100以下と低頻度で発生する可能性がある。

以上のことは、避難や人命被害の軽減という観点から見ると、対象としている圏域の居住地の安全度が比較的高いことを示している。これは、この周辺では、微高地など浸水の少ない地区が経験的に選択され、集落が形成されてきたと推察される。

また、この圏域のほとんどの地区では、たとえ計画規模以上の洪水が発生しても、建物の2階以上や高台に避難すれば、身の安全を確保できることがわかる。一方で、避難所への移動を前提とした水平避難を励行した場合、移動時の危険性が問題となる。

図4.3.4には、圏域内の歩行困難な状態になる頻度も示している。これによれば、川沿いの田畑や琵琶湖沿岸の低平地で発生し、集落外にある避難所に移動する際に、歩行時の危険性が高くなる可能性があることを示している。

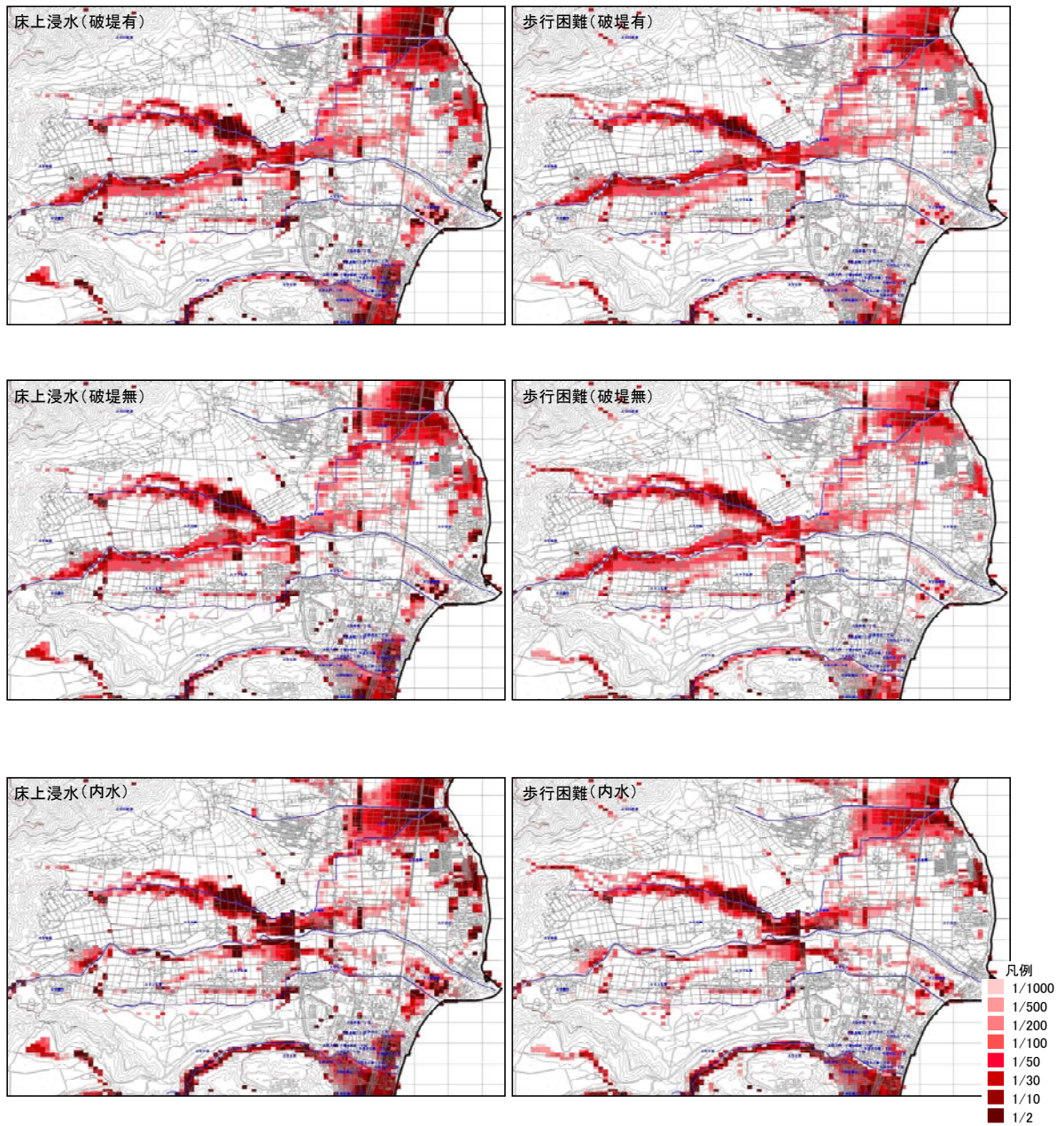


図 4.3.2 破堤条件の有無による床上浸水・歩行困難状態になる浸水頻度

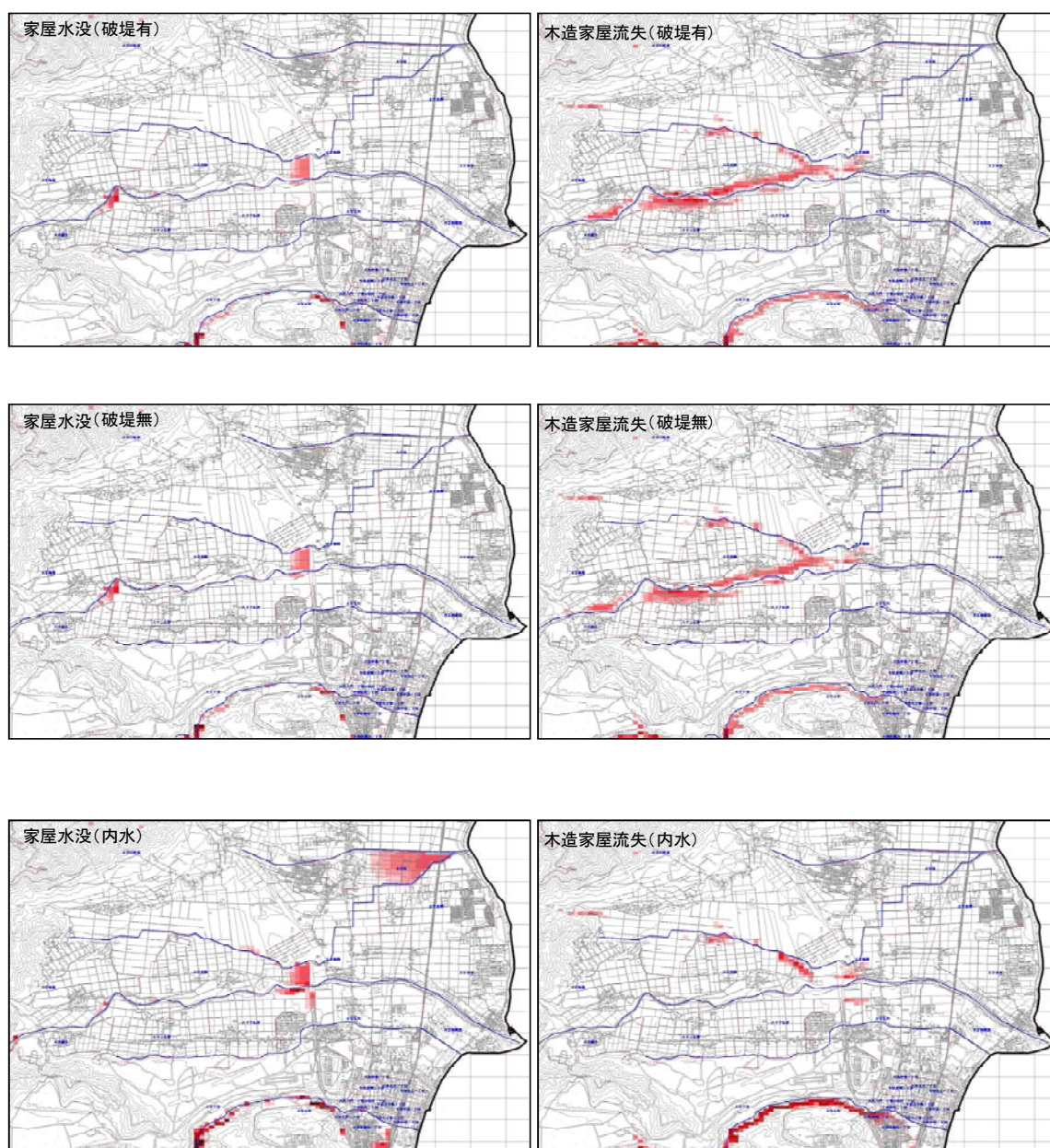


図 4.3.3 破堤条件の有無による家屋水没・家屋流出の浸水頻度

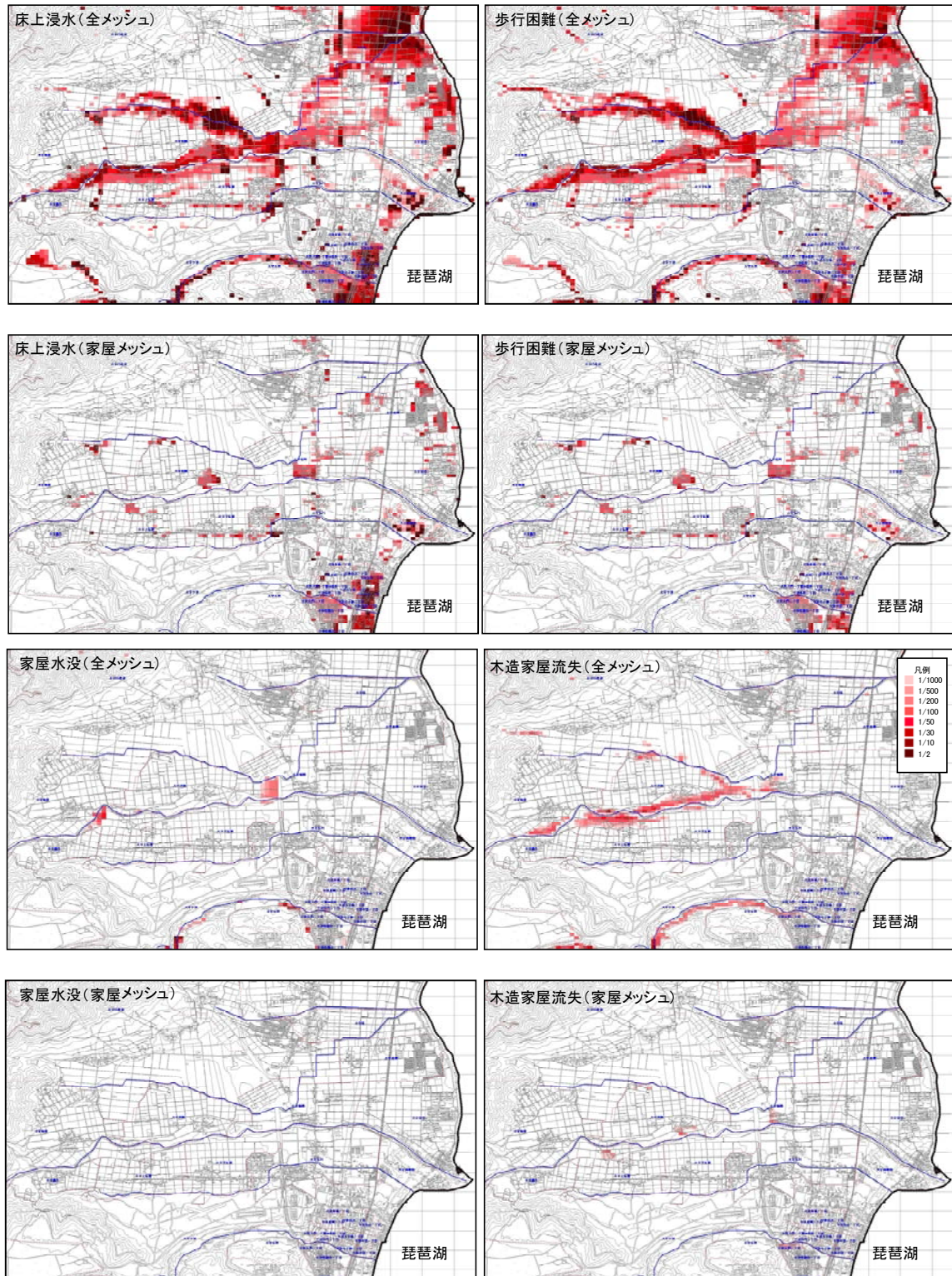


図 4.3.4 家屋メッシュのみのリスク指標に基づく評価結果

4.4 中小河川群を対象にした地区別避難判断基準の設定の考え方

避難判断基準として用いられる氾濫危険水位¹³⁾や避難判断水位¹⁴⁾は、水位、流量のハイドログラフや流下能力のネック地点を基に設定されている。これらの水位が設定されている河川の特徴として、洪水到達時間が長く、避難を判断するための時間が担保されている。これらの水位で避難勧告等の発令の判断することで河川からの氾濫に対して対処できる。一方で、堤内地では、中小河川の氾濫や内水氾濫も発生していることが十分に想定される。住民の視点に立てば、内外水の区別なく危険性が高まると予想されれば、避難することは必然的である。対象にしている圏域の氾濫解析結果から、内水氾濫から外水氾濫の変化によって堤内地の危険性が高まる地区が存在する。このような地区の氾濫特性に着目すると、外水氾濫が発生した段階で、行政が住民に向けて避難指示を発令した時、水深や流速の増加によって避難行動に支障が生じる恐れがある。そこで、内水・外水を含めた避難判断基準が必要になる。

また、対象としている圏域では、水害に対する伝承が残されており、自主的に避難行動を判断していたことが明らかとなっている¹⁵⁾。しかし、近年の河道改修による治水安全度の向上によって、古来の伝承に替わるものを提案すること、災害文化を劣化・風化させないことが地域防災にとって重要であると考えられる。

以上のことを踏まえ、現在の河川監視と古来の伝承を考慮した避難判断基準を設定するために、以下に示す3つの視点に基づく検討を行った。

① 地方自治体から住民への避難勧告等の基準

中小河川では水位データがないという現状に加え、被害発生までの時間が短いため、避難を判断するには一刻を争う可能性が高いと考えられる。地方自治体では、情報通信網の発展、気象予報・河川情報等^{16), 17)}の取得により、洪水の危険性を予測できる環境が整備されている。これを利用した地区別避難勧告等の発令基準を設定する。

② 住民が自ら避難行動を判断できる浸水イベント

災害伝承の喪失、地域の独自の避難行動を劣化・風化させないために、住民自身が目視可能なイベントと対応させた新たな浸水情報を氾濫解析から設定する。

③ 避難行動の選択

地方自治体が避難勧告や指示を発令するとき、住民に対してどのような避難方法を取るのかを明確にしておく必要がある。図 4.3.4に示す氾濫解析結果では、床上浸水や歩行困難になる地区や人的な被害が発生する恐れのある地区は限定的である。このことから避難行動として垂直避難でも可能であることが明らかである。また、この地区で昔から伝承されている災害の教訓として、河道内の特定の大木が浸水したら、家財道具を2階に上げ、住民も2階に避難していたことが明らか¹⁵⁾となっており、この地域の災害文化において、災害の経験から自主的に垂直避難を行っていた。したがって、

水平避難から従来からの垂直避難に切り替えることも視野に入れた柔軟な基準の設定を行う。

4.5 地区別避難判断基準の設定

4.5.1 地区別避難判断基準の設定方法

圏域内の超過洪水を含めた外力にもとづく氾濫解析結果から、内水氾濫が卓越する地区、外水氾濫が卓越する地区、その両方の影響がある地区があり、それらの中から家屋が水没する地区、歩行困難な状態が想定されている地区を重点的に検討した。

重点地区での解析結果から、まず内水氾濫のあとに外水氾濫が発生するといった順番になっており、外力規模によって浸水の程度が変わることがわかった。計画規模以上の降雨にも対応できるように、地区内で発生すると想定される浸水状況を把握することが必要である。

その上で、地方自治体が避難勧告等の発令を判断すべき基準を雨量や水位の指標から設定した。一方で、地区内の住民自らが目視で判断できるイベントと対応させた避難判断のための浸水情報を作成した。

4.5.2 内水氾濫に対する基準の設定

内水氾濫が卓越する地区は、その地区の排水能力が乏しく、地形的に雨水を貯留しやすいという特徴を持っている。また、内水氾濫においては、避難勧告等の発令や避難行動を判断する際に、そのときの外力に依存する部分は相対的に少ない。歩行困難な状態が高頻度で発生する地区での避難判断基準の設定例を述べる。対象にした地区は、図 4.5.1 に示す高島市中津中沼 1 丁目・南浜周辺であり、上記の特性を持った地域で



図 4.5.1 中沼地区の位置

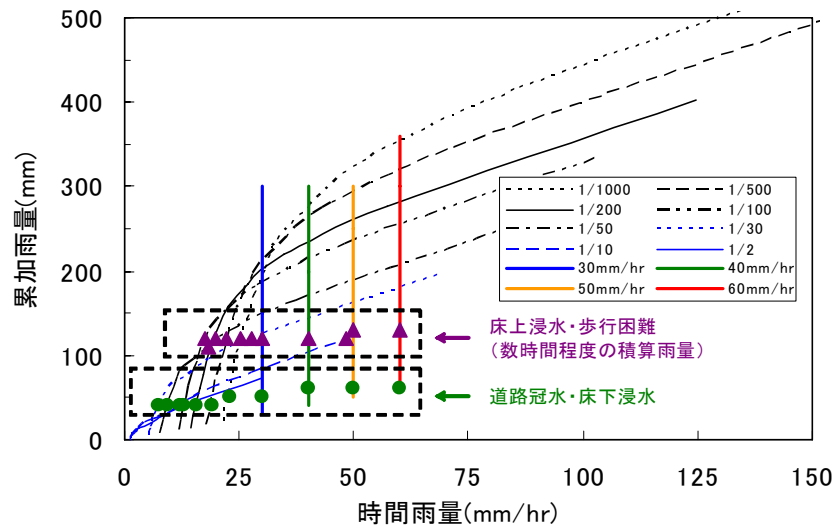


図 4.5.2 時間・累加雨量と浸水・被害の関係(中沼)

ある。

まず、氾濫解析結果から累加雨量と浸水状況を整理したものを図 4.5.2 に示す。また、当該地区で浸水が頻発している交差点付近では、時間雨量 40mm 程度で道路冠水・床下浸水が発生し、数時間の累加雨量 100mm 程度で床上浸水・歩行困難となることが氾濫解析から明らかになった。

以上のことを踏まえて避難勧告等の発令基準は、次のように提案した。これらの累加雨量の情報は、滋賀県の河川情報や気象予報から取得可能であるため、地方自治体は、床下浸水や歩行困難になる累加雨量が予想されるときに、避難準備情報を発令する。その後、床下浸水となる 1 時間雨量 40mm に達したときに、床上浸水・歩行困難な状態を想定し避難勧告を発令する。さらに、床上から歩行困難なる可能性のある累加雨量 100mm に達したときに、避難指示を発令する。

これと並行して、住民自ら浸水を見て判断することができる情報として、経験的に冠水が頻発している交差点での浸水深が 20cm 程度（縁石が水没）になるときに避難の準備をしてもらう。さらに、冠水が進み交差点の浸水深が 50cm 以上になると、周辺の住宅地で床下浸水が始まり、それ以後、降雨が継続すると床上浸水・歩行困難な状態になる可能性があるため、水平避難を前提とした避難を行う。ただし、この地区の周辺が床上浸水になっている場合、自宅 2 階、近隣の建物の 2 階に避難しておけば、身の安全は確保できるため、これを切り替えの判断基準とした。この結果を図 4.5.3 に示す。

上記の設定基準に対して、近傍の今津雨量観測所の降雨記録から、超過した頻度を調べた。時間雨量 40mm を超過したのは過去 35 年間で 4 回であり、累加雨量 100mm を超過したのは近年 5 年間で 3 回であった。

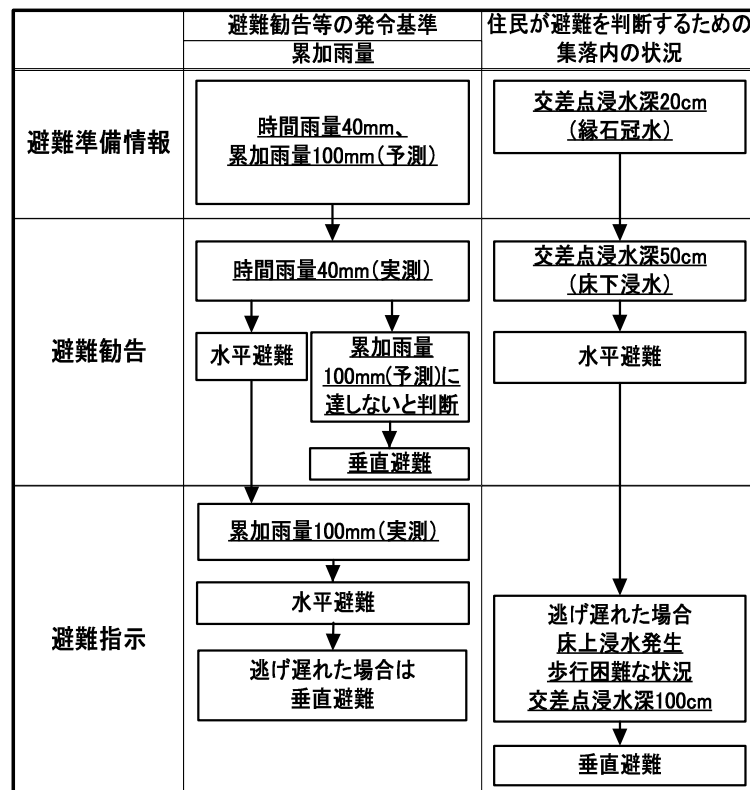


図 4.5.3 避難判断基準(中沼)

4.5.3 内外水氾濫に対する基準の設定

内水氾濫だけでは床下浸水程度であるが、河川からの氾濫が加わると、歩行困難な状態、家屋が流失するような状態が計算から確認された。このような場合、避難勧告等の発令基準は、内水氾濫から河川からの越水・破堤といった段階的に基準を設定することが望ましい。

対象とする地区は図 4.5.4 に示す高島市福岡地区（今津井之口区）である。図 4.5.5 は、石田川と上郷川に挟まれた今津井之口地区での氾濫現象を示したものである。この地区の浸水の特徴は、次の通りである。まずバイパス西側の田畑で浸水が起これるとともに、上郷川からの氾濫が流入し、集落西側の田畑の浸水深が助長される。この段階では、集落内の浸水は床下浸水程度であり、深刻な状態ではない。一方で、石田川の水位が上昇し、バイパス下流側左岸で越水破堤が発生し、一気に集落内に氾濫が広がるため、床上浸水から歩行困難と危険な状態になることがわかった。

さらに、この地区は、昔から石田川高水敷の大木の浸水をきっかけに住民の避難を判断していた。現在その大木は伐採され、災害伝承が失われており、さらに河川改修によって治水安全度は向上し洪水頻度が減少していることから、新たな指標を設定し住民へ啓発することで洪水発生後に避難行動を判断してもらうことが望ましい。

以上のことを踏まえて、この地区における避難勧告等の発令基準は、歩行困難な状態になる前に避難が完了していることを前提とした基準を設定する必要がある。そのため、基準値を設定する際に、累加雨量と時間雨量に対する各外力での氾濫現象の発

生を示したものを図 4.5.6 のように整理した。まず、内水氾濫による床上浸水が発生する可能性のある累加雨量 230mm、石田川の氾濫が想定される時間雨量 50mm が予測されたときに当該地区に避難準備情報を発令する。その後、実測で累加雨量 230mm に達したときに、床上浸水が発生する可能性のあるため、水平避難を前提とした避難勧告を発令する。避難勧告時には、夜間や暴風の中での避難となると、住民を危険にさらす可能性があるため、付加的な情報として建物 2 階以上に避難することも随時判断してもらうことを伝える必要がある。さらに、時間雨量が 50mm に達したときには、石田川の氾濫が間近に迫っていると想定されるため、避難指示を発令する。なお、石田川には水位観測所があるが、近年の河川改修のために断面形状が大幅に変更され、この地区に対する代表性が失われ、目視で確認する以外にこの地区の河川水位を知るすべがない。そこで、当該断面の HQ 式から合理式を用いて、雨量水位換算表を作成した。さらに、石田川の氾濫が始まると堤内地の床上浸水の状態から浸水深と流速の増加によって歩行困難な状態となることが想定されるため、避難指示を発令する際に、周辺の状況が床上浸水程度の場合は、逃げ遅れことが懸念されるため、垂直避難に切り替えることを促す情報を付加することとした。

一方で、行政からの避難勧告等の発令に対して、地区の周辺でどのようなことが発生しているのかを氾濫解析から把握した。まず、避難準備情報を発令する時点では、バイパス西側の田畑の浸水とそこから集落西側の田畑への浸水が始まっている状況が想定されている。さらに、避難勧告の発令時点では、井之口地区西側の田畑の浸水から道路冠水の状態になっていることから、集落内の床下浸水もこの段階で徐々にではあるが、進行してきているものと考えられる。さらに、石田川の越水・破堤によって集落内が歩行困難状態になるために、石田川の水位を監視するために、河川管理用の階段を水位標として利用し、天端から 0.5m 下がりの時点で避難を開始してもらうこととした。この 0.5m 下がりとは、石田川の過去の水位記録と氾濫解析から算定した 1 時間の最大水位上昇量を採用した。行政で把握できない情報、すなわち住民が目視で判断できる浸水情報を併用することで、行政から提供される情報を補うことが可能となり、確実な避難ができるものと期待される。図 4.5.7 は、この地区を対象に設定した避難判断基準と一連のフローを示したものである。以上のように中小河川群での避難判断基準を設定する際に、確実な河川情報が取得できないということも踏まえ、地区の自主防災会等の監視を並行して行うことで、より確実な防災体制が確立されるものと考えられる。

上記の設定基準に対して、近傍の今津雨量観測所の降雨記録から、超過した頻度を調べた。時間雨量 50mm を超過したのは過去 35 年間で 1 回であり、近年 5 年間では累加雨量 230mm を超過していない。

今後、雨量指標に対する氾濫解析の精度を検討することが課題として残っている。

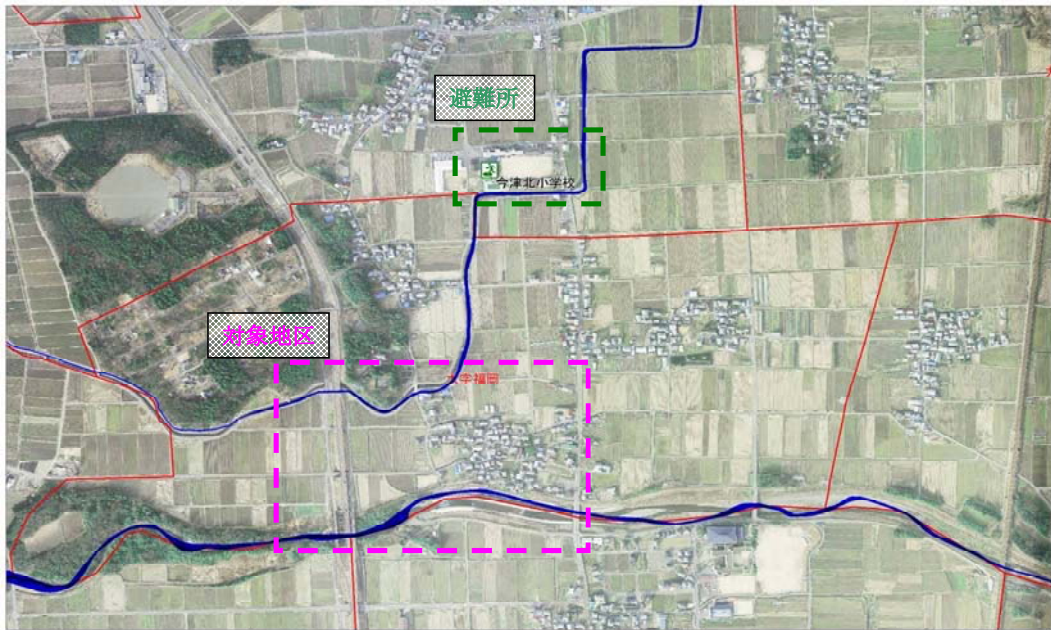


図 4.5.4 対象地区の位置

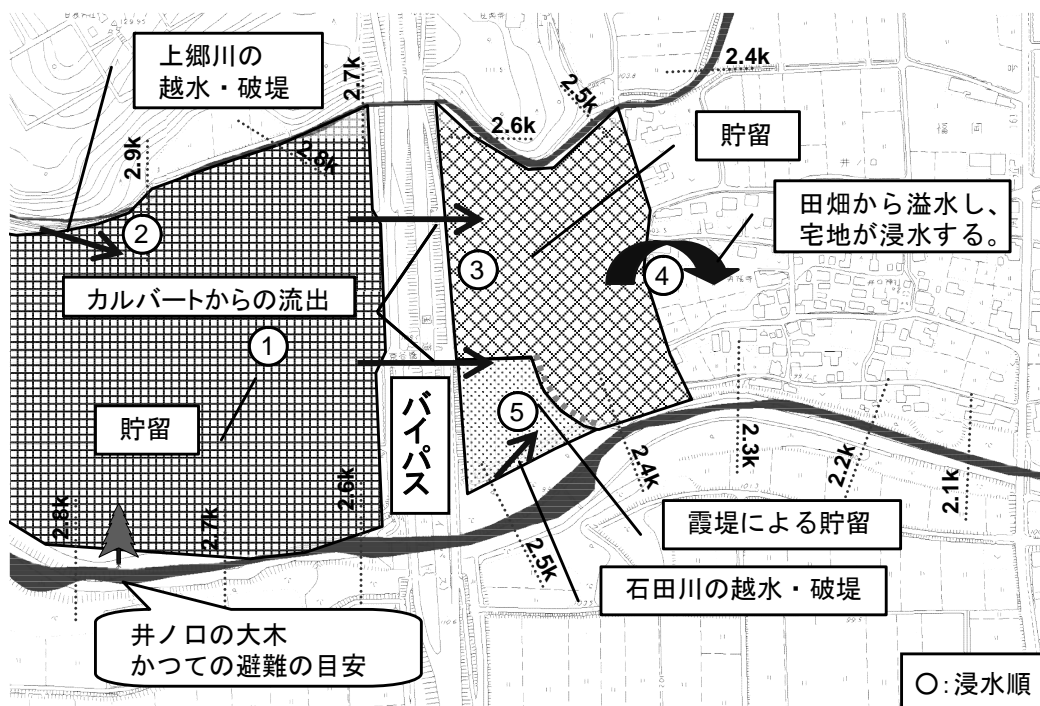


図 4.5.5 対象地区の氾濫順序と状況

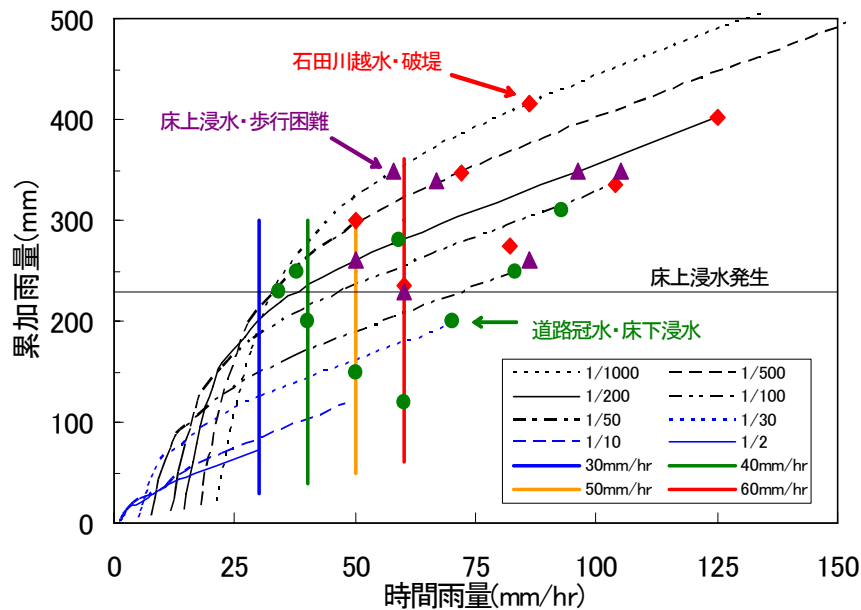


図 4.5.6 時間・累加雨量と浸水・被害の関係(井ノ口)

	避難勧告等の発令基準		住民が避難を判断 するための集落内の 状況
	内水氾濫に対する基準	外水氾濫に対する基準	
	累加雨量	時間雨量	
避難準備情報	累加雨量 230mm(予測)	時間雨量 50mm(予測) (大雨警報)	バイパス西側の 道路冠水
避難勧告	累加雨量 230mm(実測)	時間雨量 50mm(予測) に達しない	集落西側の 道路冠水 床下浸水
	水平避難	垂直避難	水平避難
避難指示		時間雨量 50mm(実測)	石田川2.5k水位 堤防天端から 0.5m下がり
		水平避難 逃げ遅れた場合は 垂直避難を励行	水平避難 床上浸水発生 歩行困難な状況 垂直避難

図 4.5.7 避難判断基準(井ノ口)

4.6 おわりに

本章では、河川や流域の水文水理情報が乏しい地域を流れる中小河川群の地区別の避難判断基準の設定について論じた。本章で対象にした中小河川群は、洪水予報や水位情報周知河川といった河川法、水防法に位置づけられている河川ではないため、避難の判断が地方自治体と住民に委ねられてしまう。本章で対象にした避難判断基準とその作成方法を明示したことの意義は、大きいものと考えられる。

本章の結論として、以下のように要約する。

- ・降雨波形に応じた氾濫解析を実施し、超過外力を含めた避難方法の検討を行った結果、ほとんどの地区における避難方法として水平避難を前提としながらも、逃げ遅れた時にも、行政・住民は一時的に垂直避難を選択できることがわかった。
- ・一方で、歩行困難な状態等で避難ができなくなる恐れがある地区においては、氾濫特性を踏まえ、避難勧告等の発令基準と合わせて、集落内の住民自らが避難の準備や行動を判断できる浸水状況について整理した。さらに、行政は住民に水平避難を前提とした勧告等を発令するが、周辺の状況や逃げ遅れ等を考慮した自主的な判断・行動を促すために、垂直避難の選択を避難勧告・指示に付加することでその状況に応じた的確な判断のための情報を示した。
- ・今後の課題として、これらの指標の他に住民等が自ら判断できる現象を計算から把握したものを現場でどう活かすのかを議論する必要がある。地区での自主防災会や住民の防災体制を支援するための備える方法として、今後の河川改修の限界を踏まえた新たな水害への対応方法に期待するものである。以後、本章で対象にした地区においては、これらの検討を踏まえて地域と一体なって自主的な避難方法を考えていく必要がある。
- ・垂直避難も選択の一つとして考えているが、歩行困難が想定されている集落内の標準的な家屋の耐水性を今後検討する必要がある。なお、個々の家屋の耐水性を評価するのは現実的ではない。そのため、水害リスクの高い地区については、災害危険区域（水害警戒区域）を設定する必要があるが、建築基準法と都市計画制度の課題抽出と整理を行い、区域指定に伴う建築条例制定等の際に技術的な根拠を整理しておく必要がある。

参考文献

- 1) 佐用町台風9号災害検証委員会：台風第9号災害検証報告書，佐用町，2010.
- 2) 土木学会平成20年度都賀川出水調査団（団長 藤田一郎）：2008年7月28日突発的集中豪雨による都賀川水難事故に関する調査研究，河川環境管理財団河川整備基金報告書，2009.
- 3) 矢守克也：災害情報のダブル・バインド，災害情報，No.7，pp.28-33，2009.
- 4) 大雨災害における避難のあり方等検討会：大雨災害における避難のあり方等検討会報告書，内閣府他，2010.
- 5) 瀧健太郎，松田哲裕，鵜飼絵美，藤井悟，景山健彦，江頭進治：中小河川群の氾濫域における超過洪水を考慮した減災対策の評価方法に関する研究，河川技術論文集，第15巻，pp.49-54，2009.
- 6) 岩佐義郎，井上和也，水鳥雅文：氾濫水の水利の数値解析法，京都大学防災研究所年報，第23号，B-2，pp.305-317，1980.
- 7) 国土交通省河川局：治水経済調査マニュアル(案)，2009.4
- 8) 栗城稔，末次忠司，海野仁，田中義人，小林裕明：氾濫シミュレーション・マニュアル（案），土木研究所資料，第3400号，1996.
- 9) 瀧健太郎，松田哲裕，鵜飼絵美，小笠原豊，西嶋照毅，中谷恵剛：中小河川群の氾濫域における減災型治水システムの設計，河川技術論文集，第16巻，pp.477-482，2010.6
- 10) 利根川研究会（須賀堯三監修）：利根川の洪水，1995.
- 11) 佐藤智，今村文彦，首藤伸夫：洪水氾濫の数値解析および家屋被害について－8610号台風による吉田川の場合－，水理講演会論文集，第33巻，pp.331-336，1989.
- 12) 河田恵昭，中川一：三隅川の洪水災害－洪水氾濫と家屋の被害－，京都大学防災研究所年報，第27号B-2，1984.
- 13) 国土交通省：危険水位の設定要領，2000.
- 14) 国土交通省：中小河川の特別警戒水位の設定要領，2005.
- 15) 滋賀県土木交通部流域政策局：水害情報発信－水害の記録と記憶－
(<http://www.pref.shiga.jp/h/ryuiki/hanran/index.html>)
- 16) 滋賀県土木交通部：滋賀県土木防災情報システム
(<http://www.shiga-bousai.jp/>)
- 17) 滋賀県県民文化生活部情報政策課：しらがメール
(<http://www.pref.shiga-info.jp/>)

第 5 章 洪水氾濫によって人的被害の発生が 想定される地区を対象にした防災・ 減災対策の適用に関する研究

5.1 はじめに

台風や前線性による豪雨にともなう人的被害は増減しているものの、ゼロとはなっていない。この要因として、ハード対策が依然整備中であるという現状や、洪水の規模が結果として大きいことの他に、水害に対する危機意識の欠如に起因している部分もあると考えられる。特にソフト対策においては、住民を主体とした防災教育による啓発等を行っているものの、その効果が十分に発揮されていないものと考えられる。一方で、行政の対応に目を向けると、避難勧告を発令することを躊躇することや、避難できない豪雨の時に避難勧告を発令するなど、その発令の判断が難しいという課題もある。

しかしながら、河川に関する雨量や水位情報は、川の防災情報や都道府県の HP を通して、公開されており、防災に関する基礎情報を取得できる環境が整備されてきている。これらの情報をうまく利用することが、今後のリスクの検知やそれに伴う避難等の判断のとなることが、行政、住民が再認識をしなければならない。

ソフト対策の本来の目的は、住民にその土地周辺の災害のリスクを認識してもらい、いかなる災害に対しても柔軟に日常の防災活動から、有事の減災行動（例えば避難行動など）が自主的に執れるようにすることであり、そのために行政といった専門家が支援していくことであろう。

このような事例として、片田等¹⁾は、土砂災害を対象とした住民主導型の避難体制の確立のためのコミュニケーション手法を検討している。その中で、住民が地域のリスクを理解し、主体的な対策実行に促すための具体的な手法として、講演型コミュニケーションの採用、地域住民の災害文化の活用、自主避難ルール作成、さらにその継続的な活用と取り組み、までの流れを提示している。また、山田等は²⁾、水害コミュニケーションにマネジメントサイクルの一つである PDCA サイクルを採用し、内外水氾濫を対象にした災害図上訓練を通したリスク・コミュニケーションの経験が、住民の防災意識の向上に重要な役割となることを指摘している。また、畑山等³⁾は、メンタルモデルを用いた行政・住民間の水害リスク・コミュニケーションを提案し、これを実現するための支援システムを開発した。このシステムを愛知県新川流域の市町を対象に実証実験が行

われ、水害に対する意識の向上が確認されたばかりでなく、地域の指定避難所に対する問題と一時避難所の必要性に関する議論が発生した。このシステムにより、一定の防災式の向上に効果があることが示されている。

これらの研究では、住民の持つハード対策に対する期待が大きいことや、システムによる効率的にリスク・コミュニケーションを促すことで、一定の防災意識、居住地区の防災上課題とその解決に一定の効果を上げていることを指摘している。しかしながら、河道改修による治水安全度の向上とその限界、治水計画以上の洪水の発生が否定できない気象・水象環境におかれている地先での非構造的対応の推進の課題とその解決に向けた取り組み実施された事例はない。

本章では、地先の洪水対応としての考え方として、堤外地、堤内地の洪水氾濫のリスクを理解させること、河川管理者とそれ以外の関係者との関係を明確にすること、これらを意識しつつも、官民協働で減災対策を実施するべきと考えている。滋賀県では、流域治水対策の一つとして長浜市・米原市を対象にした湖北圏域水害に強い地域づくり⁴⁾が進められている。ここでは、人的被害が発生する可能性が高い米原市村居田地区を対象にした『備える対策』⁵⁾の実現が図られている。本章では、この取り組みにおけるリスク・コミュニケーションのプロセスを踏まえて、今後のソフト対策の進め方について提案を行うものである。具体的には、約2年間で実施した地区と行政の議論と、その合意過程、施策の実施内容について説明する。さらに、そのプロセスが、既往の研究等でのリスク・コミュニケーション手法とどのような関係にあるのかを明確にする。

5.2 対象流域の概要

対象とした地区は、図5.2.1に示す米原市村居田地区であり、米原市と長浜市の境界に位置している。西側には横山があり、北側は姉川が流れている。現在、村居田地区の世帯数は約120世帯、人口は約400人で構成され、高齢者が多くしめている。

図5.2.2に示す村居田地区においても、過去に幾度も水害の被害を受けてきた。平成22年度に行った村居田地区を対象とした聴き取り調査を実施し、過去の水害に関する情報を収集した⁶⁾。その中で、最も古い水害は、1361年（康安元年）の水害で、姉川の井之口・村居田あたりが決壊し、田畑が流失したという話が伝わっている。また昭和に入ってから洪水では、昭和34年8月の台風7号による洪水で、村居田地区の下字で床下浸水の被害が発生した。さらに、同年9月の伊勢湾台風では、姉川と支川出川の合流部より少し上流の堤防が決壊し、田畑の流失が起きた。この伊勢湾台風では、市道橋の橋脚も落ち込み、市道橋が沈み下がるといった被害も発生した。



図 5.2.1 米原市村居田地区の位置

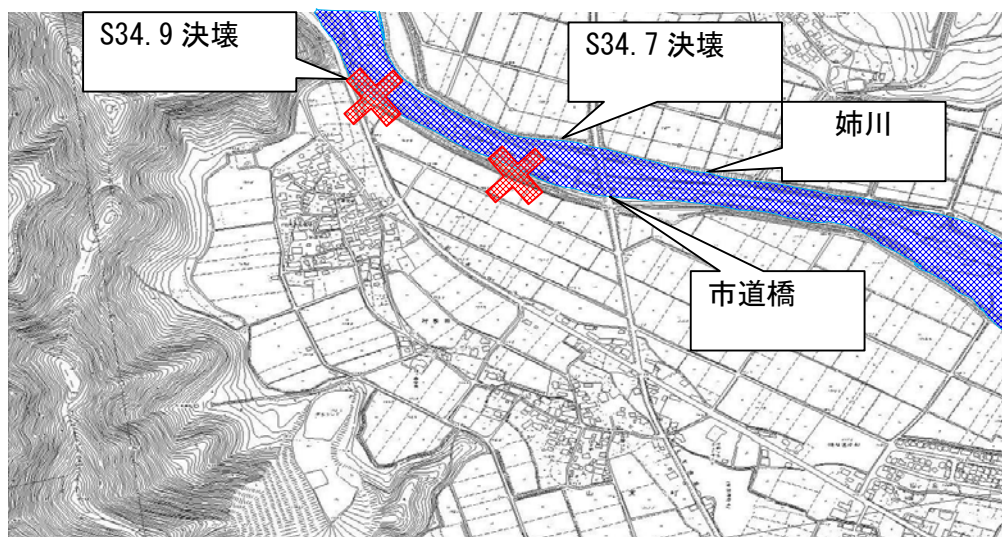


図 5.2.2 村居田地区と昭和 34 年洪水の決壊位置

5.3 対象地区の氾濫特性と洪水対策の課題

5.3.1 浸水想定区域図と洪水予報河川

姉川は、洪水予報河川に指定されており、超過確率 100 年の降雨量 440mm/2day に引き伸ばされた昭和 28 年 9 月型洪水が襲来したと想定したときの浸水想定区域図⁷⁾が公表されている。図 5.3.1 によれば、村居田地区の最大浸水深は 2m～5m であり、人的被害発生のリスクがある。

一方で、洪水が発生した場合、上流側に伊吹水位観測所がある。これにより、洪水の発生に伴い洪水予警報が発令される。

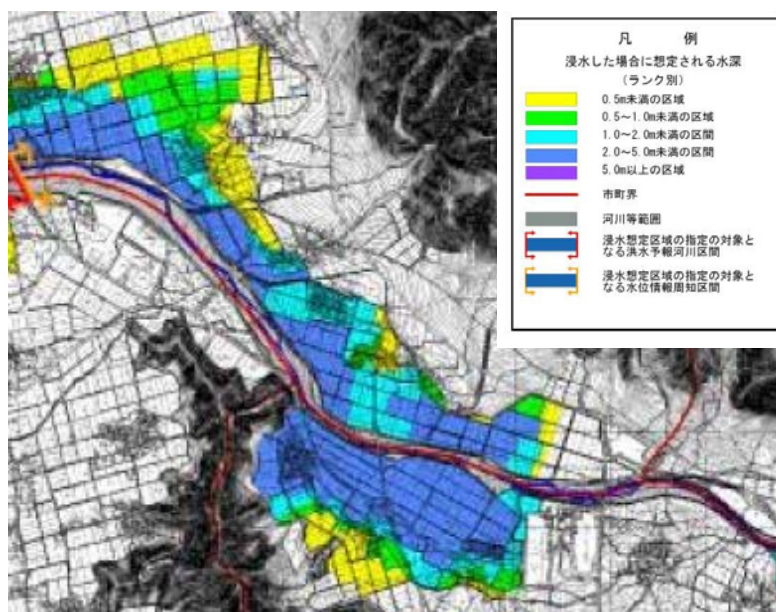


図 5.3.1 浸水想定区域図における村居田地区の浸水深分布

5.3.2 村居田地区の水害リスク評価

滋賀県が推進している流域治水対策においては、滋賀県全域の氾濫リスクを同一降雨で評価している。この方法については、瀧等の論文⁸⁾に詳述されている。ここでは、氾濫解析手法は同一のものであり、評価対象とした外力は、滋賀県降雨強度式から 100 年確率規模の降雨波形を与えた場合の氾濫特性を把握した。

村居田地区における氾濫特性は以下の通りである。

- ・最大流体力は、図 5.3.2 に示すように、流体力は $2.5\text{m}^3/\text{s}^2$ を超えないと予想される地区であり、洪水流によって家屋が流出する可能性はないと考えられる。
- ・最大浸水深は、図 5.3.3 に示すようにほとんどの範囲で床上浸水以上が発生し、姉川と村居田地区を流れる出川合流部附近で浸水が深くなり、 3.0m を超えることが予想される。

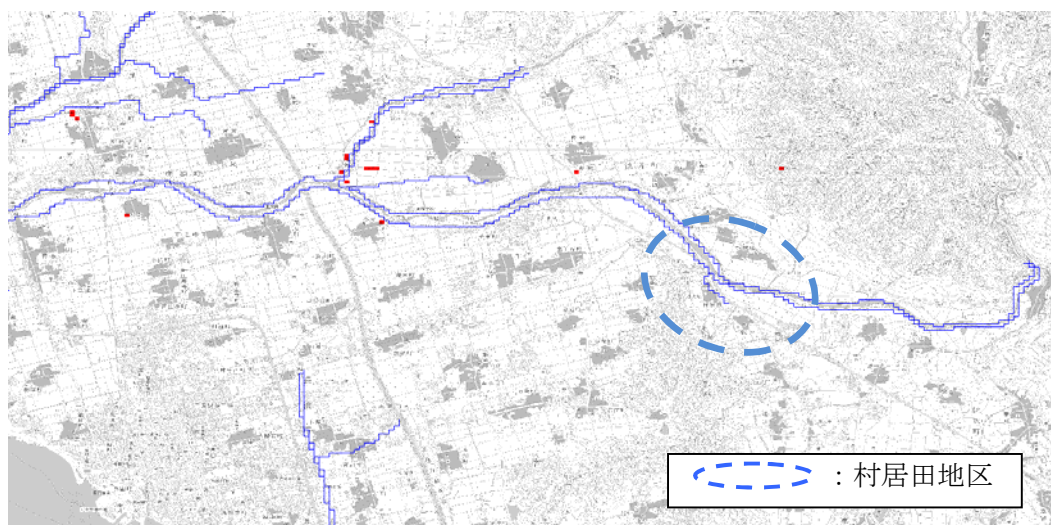


図 5.3.2 最大流体力分布（超過確率 100 年規模）

以上の傾向から、水害の危険性を評価するために 10 年～200 年までの氾濫解析を行い、家屋流出、家屋水没および床上浸水の発生リスクを評価した。その結果を、図 5.3.4～図 5.3.6 に示す。頻度から見ても、家屋が流出する流体力が発生する可能性はないものと考えられる一方で、家屋水没については、姉川合流点付近において 3m 以上となる 1 年間における発生確率が 2%程度（超過確率 20 年相当）あることから、頻度は高いと言えよう。また、河川整備が終わったとしても、姉川本川の排水の影響を受けた内水氾濫と上流の破堤による効果が大きいため、人的被害が発生する可能性が高いと考えられる。

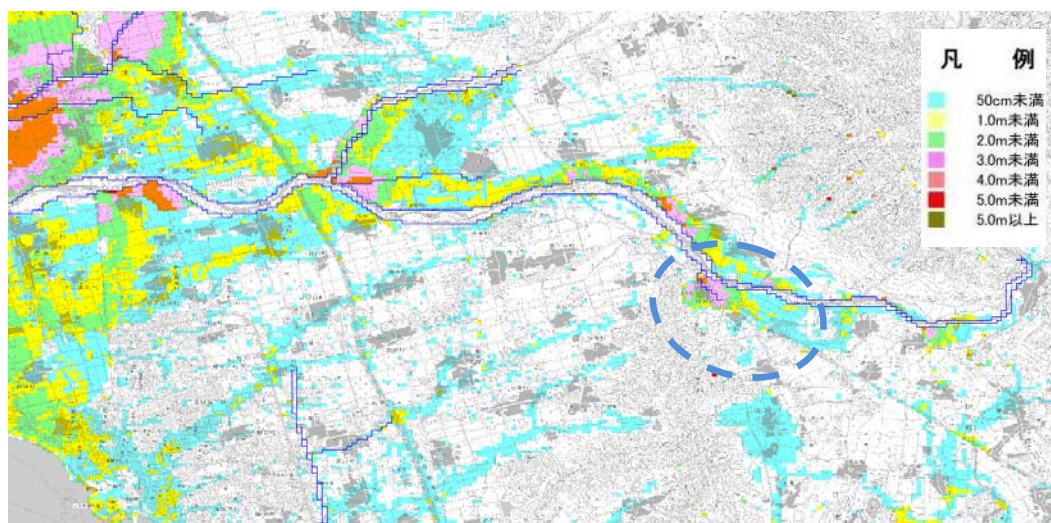


図 5.3.3 最大浸水深分布（超過確率 100 年規模）

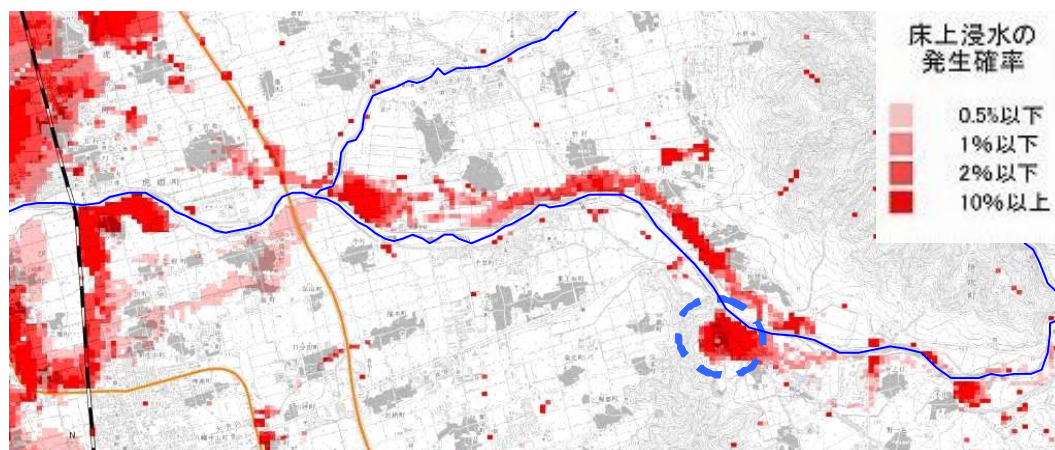


図 5.3.4 床上浸水リスクの分布

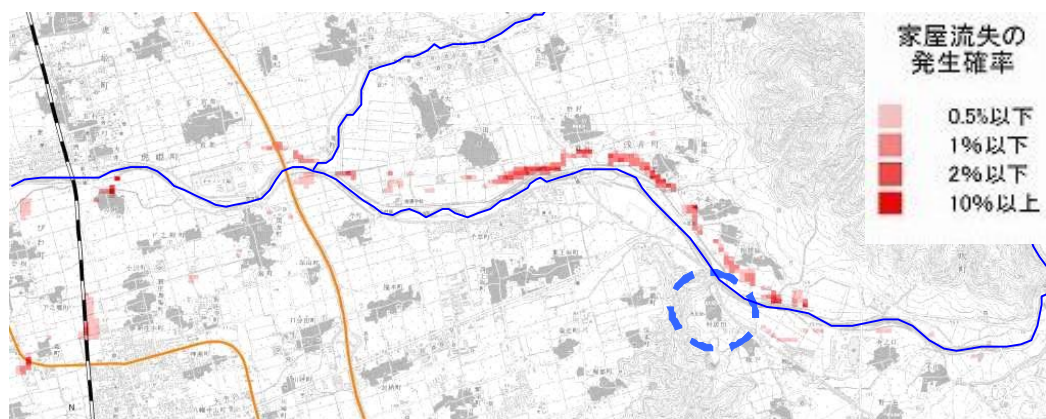


図 5.3.5 家屋流出⁹⁾リスクの分布



図 5.3.6 家屋水没¹⁰⁾リスクの分布

5.3.3 氾濫を想定した場合の洪水対策上の課題

村居田地区における洪水対策としては、以下の通りである。

- ・姉川の河道改修規模を向上させる。これは、河川整備計画の工事实施によって実現する。しかしながら、整備期間は 20 年間となっており、その効果が発現するには、時間を要する。
- ・一方で、計画規模が概ね 20～30 年の確率規模であるため、完全治水の実現は不可能である。したがって、洪水規模によっては、浸水の発生は免れないというのが現実である。

以上から、流域治水対策においては、洪水に備えることを重視した取り組みが必要であることが明らかである。

5.4 洪水対応の実施までのプロセス

5.4.1 協議会が中心となったワーキングの実施

湖北圏域水害・土砂災害に強い地域づくり協議会においては、村居田地区への減災対策の必要性の説明とその具体的な対策を実施した。表 5.4.1 は、平成 22 年度において、村居田地区との会議の内容を議事録を元に整理したものである。この会議には、村居田地区の自治会役員と、滋賀県の土木・防災・環境部署をはじめ、国土交通省、米原市、学識経験者といった行政・大学関係者が会して計 8 回の会議を行った。

第 1 回では、氾濫の特性を示すとともに、住民要望である河川改修を実現していないことに対する行政への反発意見が多かった。これは、昭和 34 年の伊勢湾台風で被害を受けた地区であり、被災経験者が含まれていたことや最近の豪雨被害の報道で不安になっている事に起因しているものと考えられる。また、この地区における高齢者の占める割合が年々増加しているという実情や、避難所への移動に時間を要するといった、ソフト対策の実現性に対する不満も重なっている。このような背景もあり、当初はハード対策への要望が強かったが、地区の歴代区長や自主防災会が参加した会議では滋賀県の示す『備える対策』に対して理解を示していただいた。その後、第 2 回では、ハード対策に対する住民の方への回答や今後の行政の支援について、行政関係者とコンサルタントで方向性を決定した。ここでは、滋賀県としての河川整備の考え方に沿った改修計画について説明することや、治水バランスを考慮しながら改修を行っていくことを説明することとした。第 3 回では、地区内の危険箇所の把握の他に、今後のソフト対策の推進の方向性について、住民側の要望を取り入れながら、ソフト対策の推進計画としてとりまとめた。

表 5.4.1 平成 22 年度の会議の内容とキーワード抽出

	月日	協議事項	主な意見等
平成 22 年度	10/29	・村居田地区聴き取り調査	・過去の洪水被害についてヒアリングを実施した。
	12/10	第 1 回ワーキング（以下、WG）： ・具体的な取り組み内容 ・氾濫シミュレーションによる 水害リスクの把握	・『備える対策』の説明は、 <u>行政のパフォーマンス</u> のような話に聞こえる。河川改修等の従来からの要望の見通しについて説明してもらい、 <u>安心感</u> を得たい。 ・ <u>指定避難所への避難</u> をすればよいと考えている。 ・防災に関する <u>情報伝達</u> は重要であるが、 <u>組織作り</u> ができていないのが現状である。行政無線での声も豪雨で聞こえない。 ・避難所への案内板に地盤高と浸水深を表示したら分かりやすく、 <u>啓発</u> に繋がると思う。 ・データ放送で <u>防災情報を知る</u> 仕組みがあればいい。
	2/7	第 2 回 WG：行政関係者のみ ・減災対策による被害軽減効果の評価	・ソフト対策の気運が高まる中で、河川事業以外の要望への対応は、現時点での判断が難しく、検討した結果を住民に示すのは適切ではない。 ・LP データの精度を上げるために、住民と一緒に <u>地盤高を測量</u> し、それをマップの作成等に生かすことが有効である。 ・要望が上がっている河川改修の順位といった <u>流域内の治水バランス</u> の考え方を周知する。
	3/3	第 3 回 WG： ・現地調査および地盤高測量の 実施（地区の避難の為の基 礎情報とするために詳細な 地盤高情報を取得） ・今後の備える対策の方向性	・村居田地区の <u>地域特性</u> を把握するために、住民の方が危険と思っている箇所や避難所の案内の点検を行った。 ・地盤の低い箇所を把握するために、 <u>測量</u> を行った。 ・村居田地区で作成が予定されている <u>絆マップ</u> （防災マップ）に浸水に関する情報を記載する。 ・この情報に基づき、 <u>避難場所へのルート</u> も調査し、 <u>図上訓練</u> を行う。 ・外水氾濫の <u>監視場所</u> として市道橋の橋脚、内水氾濫の発生を監視するために集落内に簡易的な量水標を設置する。 ・集落の中に、 <u>浸水深の目安</u> を示す。

それ以後については、地区に必要な基礎情報の収集、洪水に対する危険性の周知や啓発方法について議論を行った。

5.4.2 ハード対策の要望とその対応

表 5.4.1 に示す会議内容の中で、ソフト対策を推進する上での施策である『備える対策』に対する反論的な意見として、「行政のパフォーマンス」「安心感」といった言葉が住民から出てきた。これは、過去からの要望である河道改修による治水安全度の向上に対するものであり、安全な地域づくりを望んでいる現れである。これに対して、河道改修計画の説明のみならず、流域内の治水上のバランスについても説明を行った。この中で、対象とする地区においては、今後の 20～30 年間で整備されること、その対象確率規模が約 30 年程度まで向上することを説明した。すなわち、ソフト対策の必要性を強調するのではなく、ハード対策もあわせて推進していくことを説明した。地域の方の命を守るためには、ハード対策だけでは必ずしも守りきれないことを、氾濫解析結果から説明した。これらの一連の説明を行っていくことによって、未曾有の洪水が発生しても少なくとも命を守るためには、地区での備える対策の重要性が理解されたものと解釈している。

しかしながら、このような地域と一体となってソフト対策を推進するためには、広義に捉えた流域治水対策の一つとしてソフト対策があるという位置づけで、ハザードマップ等の浸水想定区域図や改修後にはこのハザードマップに示されている被害はなくなることが重要であると考えている。一方で、それ以上の洪水が発生すれば、どのような浸水被害がもたらされるのかを示すことが、ソフト対策を進める上で必

要であると考えられる。

また、河川改修による対策ではなく、姉川の破堤時後の浸水を遅らせるために、道路を嵩上げして堤防の代わりにしてはどうかといった対策も住民から発案された。しかしながら、現時点で他機関との調整と結論に至までのプロセスに時間がかかる対策においては、住民と約束できない事項として取り扱い、今後の検討課題として位置づけた。しかしながら、ソフト対策について行政・住民で議論をする過程において、浸水を軽減するためのハード対策の有効性については、今後費用対効果を含めて検証する必要があると考えられる。また、このような住民からのボトムアップ型の減災対策の実現性についても関係機関と協議し、人的被害を発生しない地区とするための対策を立案することが必要と考えられる。

5.4.3 防災情報の課題と対応

住民と議論の過程において、住民から情報という言葉が幾度となく発現された。これは、情報を提供される側の最大の努力は、身近な情報をいかに取得するのが鍵となる。そのような中で、情報を活用する観点から、地域の防災組織づくりの課題や地域に関わる防災情報の取得方法の課題について提起されたことは、この会議の開催意義が大きいものであったと言える。実際には、行政側からこの地区に関する防災情報を取得するための手法として、地上デジタル放送での水位情報、滋賀県土木防災情報 HP による洪水予測情報（3 時間先）、携帯へのメール配信について説明を行った。さらに、内水河川の氾濫に伴う道路冠水などの初期段階の情報は、行政側では入手することは不可能であるため、地区内で起きている内水河川の水位を監視するために、量水標を設置することとした。

5.4.4 備える対策への協働

平成 22 年度におけるワーキングでは、住民と行政における備える対策の方向性について議論した。これを受け、平成 23 年度には具体的な施策の実施に向けた検討を行った。

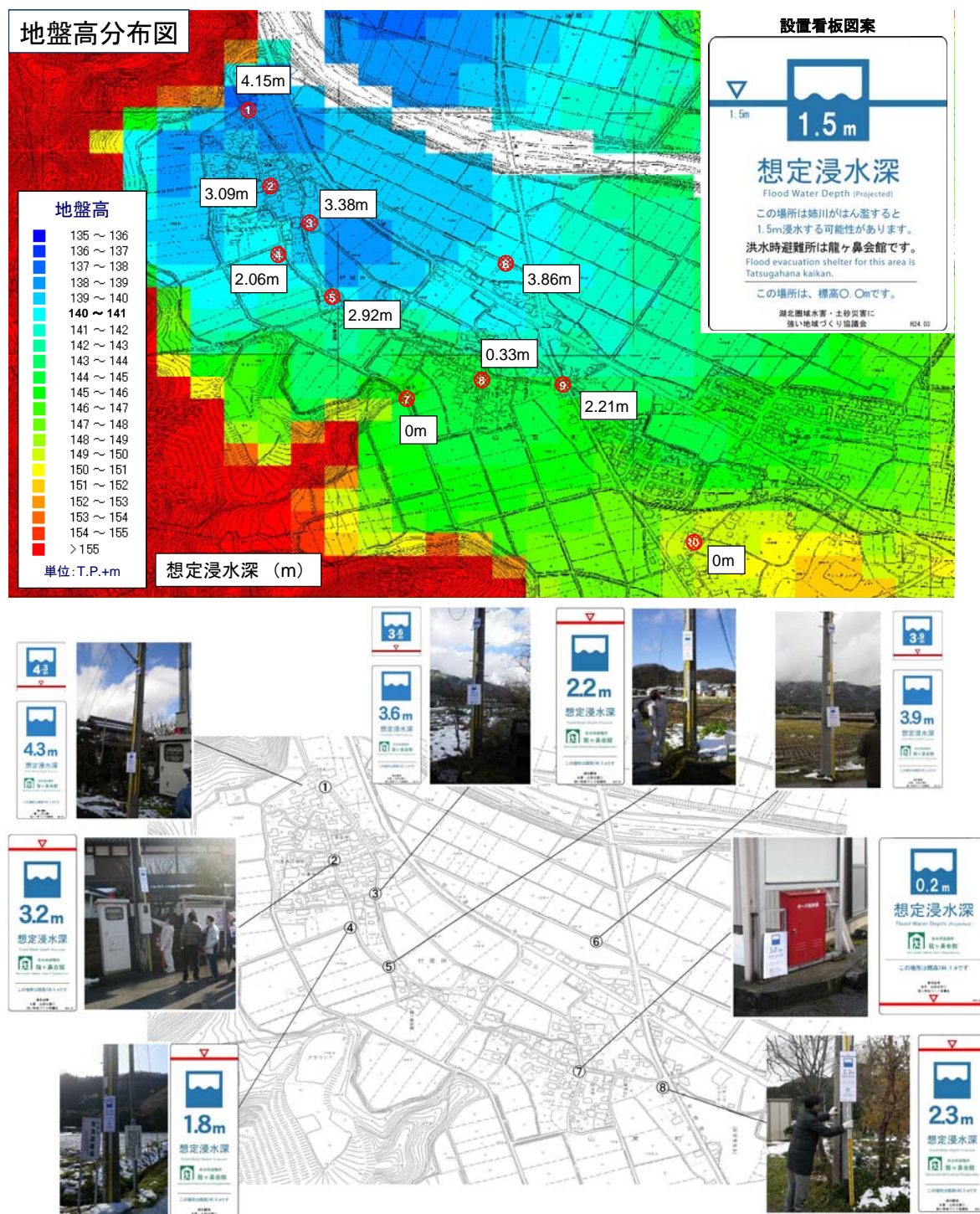
表 5.4.2 には、平成 23 年度の会議内容について示す。

表 5.4.2 平成 23 年度の会議内容と決定事項

	月日	協議事項	主な意見等
平成 23 年度	7/26	第1回 WG： ・絆マップへの情報の追加 ・まるごとまちごとハザードマップの設置について ・出川の簡易量水標の設置について ・周知用看板（市道橋と伊吹橋の水位関連付け）の設置について	・それぞれの施策の具体化に向けた行動計画を作成した。 ・避難する場合、 <u>情報の流れ、河川の監視、安全な避難ルートの設定</u> 等について、 <u>運用上の課題</u> が抽出された。 ・これらの課題を字単位で抽出し、その解決として一般の住民にも考えてもらうために、 <u>水害図上訓練</u> を実施することを決定した。
	10/7	第2回 WG： ・避難ルート案について ・まるごとまちごとハザードマップの設置候補箇所 ・簡易量水標の設置箇所について・周知用看板案について ・現地確認（まるまち、簡易量水標）	・避難ルートについては、水害図上訓練での意見を参考にして設定する。 ・まるごとまちごとハザードマップの看板設置位置とデザインについて、自治会は行政側から提示された案に基づき検討を進める。 ・ <u>簡易量水標</u> の位置について、自治会から要望を受けて2カ所に設置する。
	11/27	第3回 WG： ・水害図上訓練（現地確認・発表・講評）出前講座（水害発生その時！命を守る日ごろの備え）	・地区の一般の住民が参加した図上訓練では、地区内の <u>危険箇所、避難ルート案</u> が示された。 ・訓練において、自治会役員以外の一般の住民の防災意識の向上が確認できた。
	12/20	第4回 WG： ・避難ルールづくり ・まるごとまちごとハザードマップ 設置箇所案 ・出川 簡易量水標の設置イメージ ・姉川市道橋 周知用看板案 ・現地確認（まるまち設置箇所案） ・地盤高測量	・行政側から、避難ルート案を提示し、自治会で最終案を検討する。 ・まるごとまちごとハザードマップの設置位置を現地で測量を交えて確認し、デザインについて地区の要望として、浸水ラインを赤で表示することを決定した。 ・それ以外の施策についても現地で設置位置とデザインを確認し、最終決定した。
	2/3	第5回 WG： ・避難ルールづくり ・まるごとまちごとハザードマップ 設置箇所・デザインの確認 ・村居田地区 水害に強い地域づくり計画（素案） ・今後の進め方について	・避難ルールについては、住民側から絆マップに反映したものを提示されたのを受け、行政はデジタルデータとして整理する。 ・まるまちハザードマップのデザインの変更点について確認した。 ・避難所を指定避難所である小学校から、洪水においては高齢者の移動や距離が遠いことから、地区内にある <u>龍ヶ鼻会館</u> （公民館）に変更し、まるまちハザードマップの看板に反映させることで決定した。 ・ <u>水害に強い地域づくり計画</u> を、実施した施策に基づき作成した。自治会は、この計画案の内容について確認することで決定した。

まず、各施策の活動内容について、会議の中で行政と住民が合意し、以下のように決定した。

- ・県がこの地区での災害経験者にそのときの体験談等をヒアリングし、図 5.4.1 に示す「村居田水害時の道しるべマップ～伝承したい水害の備えと知恵」を作成した。このマップには、過去の実績浸水範囲、破堤地点、霞堤の位置の他に、会議や現地調査で得た地区内の危険な箇所について記載した。さらに、減災のための工夫、村居田で行われている水防工法、水害時の体験談もマップの裏面にとりまとめた。



- ・内水河川であり、姉川の背水の影響を受けて氾濫する出川を監視するために、図 5.4.3 に示す簡易量水標を 2 カ所設置する。設置位置については、住民自らが提案し、普段からよく通る道の見やすい箇所に決定した。（過去の洪水での水位上昇が早く、平成 23 年の台風 6 号の時に道路からわずか 15cm くらい下がったところまで水位が上昇した）

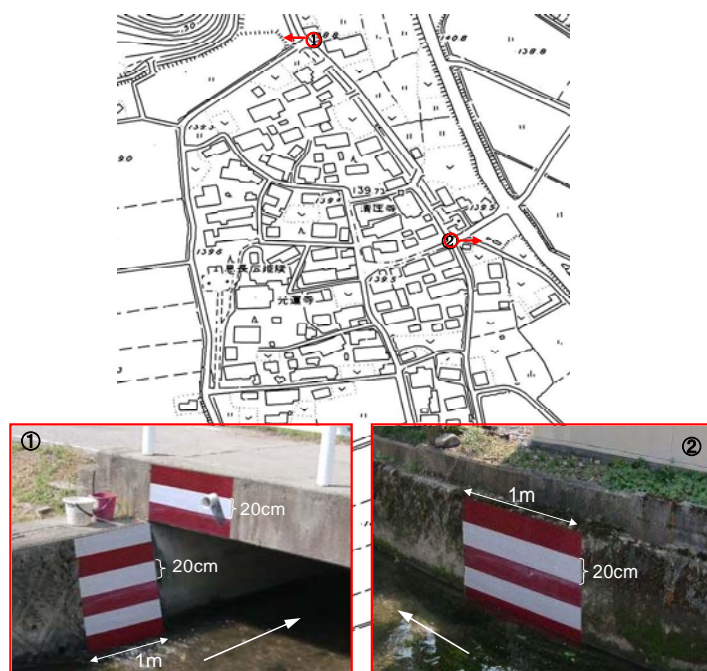


図 5.4.3 支川出川に設置した簡易量水標

- ・姉川の水位を監視するために、近隣の市道橋の橋脚に簡易量水標を設置し、上流の水位観測所の水位との関連性を解説した周知用看板を設置する(図 5.4.4 参照)。なお、この橋は、以前から住民側が洪水の発生に伴い、河川を監視する場所として慣習化されてきた場所である。さらに水位関係表を広く住民に周知するため、現地(市道橋の村居田側)に水位関係表が示された周知用看板を設置するとともに、活用方法等を説明するための広報用ビラを作成し各戸に配布する。姉川市道橋の簡易量水標や、伊吹水位観測所との水位関係が示された周知用看板を活用し、情報の収集・把握に努め、水防活動に役立てられることが期待される。



図 5.4.4 市道橋左岸に設置した周知用看板

- ・ 図 5.4.6 に示す住民の方の手作りマップを基本に、避難ルートを記載し、そのために自治会の役員だけではなく、一般の住民も水害図上訓練に参加して作成することとした。なお、図 5.4.7 に示すように行政側でデジタルデータに変換した。



図 5.4.5 村居田 水害時の道しるべマップ～避難ルール版～
(2012.2.3 自主防災組織会長製作)



図 5.4.6 村居田 水害時の道しるべマップ～避難ルール版～
(2012.2.3 自主防災組織会長製作のデジタル化)

こうした具体的な施策を推進することで合意したが、一方で、運用上の課題も会議の中で住民側から以下のような指摘を受けた。

- ・周知用看板にしたがい、自治会、住民が避難判断・行動に移した場合に、発生した事故は、責任問題となるのではないか。
- ・水位換算の方法について、精度はあるのか。
- ・洪水時の避難場所として、どこがいいのか。
- ・地区内には水路が多く、避難時の安全を確保するための対策はどうしたらいいのか。
- ・避難判断までの情報の伝達方法の明確にする。
- ・避難ルートは、字単位で設定する必要がある。

以上のように、施策の実施に伴い、単にツールとして捉えるのではなく、組織づくりと組織の役割に関する話題に展開した。すなわち、これらのツールを用いた避難判断のルールの運用上の課題が浮上しはじめた。これに対して、行政側からは住民の行動に対する要望やそのための支援方法として、以下のように提案を行った。

- ・自治会が自主的に判断して避難をした場合、自治会に責任問題は発生しない。ただし、自治会が避難を判断した場合や地区周辺の状況を行政が知ることは実質困難であるため、報告してほしい。
- ・河川管理者（滋賀県）は、姉川の水位観測所と近隣の橋梁地点の水位の換算表の精度を担保するために、水位計を設置する。さらに、洪水毎にその精度を検証し、適宜周知用看板と各戸配布されたビラの水位換算表の修正を行う。
- ・洪水時の避難所は基本的に自治会で決めて構わない。
- ・自治会は、洪水時の避難場所をこの地区内で移動が容易な龍が鼻会館（近傍の公民館）とすることを決定した。これは、地域の年齢構成から指定避難所である小学校への避難することが困難であることが決定要因となった。なお、地震時には、指定避難所に避難することとする。
- ・避難計画として、自治会が自主的に作成した。これは文章化されたものではなく、洪水時の避難ルートとそれ沿いの危険な箇所、避難の目安となる簡易量水標の位置、啓発用のまるとまちごとハザードマップの設置位置、姉川の水位換算方法をマップ上に示していたものである。行政側は、これを配布用にデジタル化し、住民側に引き渡した。なお、今後はこのマップに基づく避難訓練を実施し、減災対策の検証を行うことが課題である。

5.4.5 WGにおけるリスク・コミュニケーションのプロセス

本章では、前述したワークキングでの議論を踏まえると、以下のようなリスク・コミュニケーションが重要であることを提案する。これらは、Rowan¹¹⁾が提案している CAUSE モデルとほぼ同じようなプロセスであると言える。

(1) リスクの理解

当該地区における洪水（内外水氾濫）によるリスクについて、外水を対象にした浸水想定区域図のみならず、外力規模を同一にした内水氾濫解析も含めた氾濫解析結果から、他地域とのリスクを比較したときのリスクについて示した。これにより、ハード対策のみならずソフト対策の必要性について説明し、ソフト対策の推進について合意を得たことや、それによって住民側の主体性が醸成されてきたことが上げられる。

これらの理解の中には、行政が住民から信頼され、住民は、行政からの提示された地区のリスクに気づく過程の中で、リスクに対して理解を深めていったと言える。この過程の中で以下の『ソフト対策の目標』が形づけられてた。

(2) リスクへの対応の方向性

住民は、主催者が意図するリスクへの理解を十分に持ってもらえないものと考えられる。そこで、一連のワーキングでは、絶えず浸水深、流速のマップを示しながら、議論を重ねてきた。その結果、どこが危険であるのか、どこに逃げれば良いのかという、地区内の防災上の重要な問題に対する認識に変化を与えたものと考えられる。すなわち、行政が指定した避難所に逃げれば良いという当初の認識から、地域の実情等を踏まえた新たな選択（一時避難、避難所の変更）を住民側が実施したことは、大きな変化である。

また、住民が浸水によって地域のリスクを認識・受容するには、時間を要するものと考えられるため、行政の持つ氾濫解析結果とその評価を、繰り返し説明することが、リスクに対する地域のあり方を議論する上で重要である。

(3) 減災対策の実施

ソフト対策においては、単にツールを提供するのではなく、住民側が地域の安全を担保するために必要なツールについて認識した上で、まるごとまちごとハザードマップの設置、姉川の河川監視方法と避難との関連性、内水河川の監視、避難所の変更と周知、地区内の危険箇所の把握具体的な提案を行った。これにより、住民による避難行動に対するルール作りが始まった。この背景として、既に地区別の避難判断基準（案）¹²⁾が提案され、これを利用した行政からの避難勧告と並行した自主避難（一時避難や避難所への移動）の必要性について啓発できたものと考えられる。

(4) 継続的な活動の支援

以上のソフト対策の効果を発現させるためには、防災訓練等を継続的に行うことが必要である。そのため、水害を想定した訓練が、住民側の発案で実施された。まず、参加者による図上訓練だけではなく、同時に地区内を歩いて、避難時の危険な箇所や伊勢湾の時の災害状況などを抽出し、住民が気づいた箇所の写真やスケッチとして記録を残すように実施した。この結果を図 5.4.6 に示すマップに記載した。さらに、自治会役員が一連の成果としてソフト対策の必要性を、全住民に説明することを予定している。これは、この2年間の行政と住民の取り組みを、より広く知ってもらうことを目的としてい

る。

今後の被害が甚大となる地区においては、行政とのリスク・コミュニケーションだけでなく、一定の成果を発表する機会を設定し、地域の継続的な防災活動に繋げてもらうために、住民から住民へのリスク・コミュニケーションも必要であると考えている。また、今後の自治会の役員以外の住民への防災意識の向上に重要な役割があるものと考えられ、継続的なモニタリングが今後必要であると考えている。

5.5 おわりに

本章では、米原地区における備える対策の実施過程において、行政と住民の関わり方のプロセスや住民の意思決定に、行政が持つ情報の開示や、超過洪水でのリスクを示すことが重要であることを示した。

本章で得た結論を以下に要約する。

- ・対象とした米原市村居田地区における様々な備える施策が、行政と住民で双方の合意の下で実現した理由の一つとして、水害時における地域のリスクを開示したことにあると考えられる。さらに、このようなリスクの理解と受容が、住民の自主的な避難判断や行動といったポジティブな姿勢に移り変わったとき、これらの施策のもつ機能が、地域における人的被害をゼロにするために有機的な作用が働くものと期待できることを示した。このような、住民の主体性が行政側からのアプローチを越えると想定されるような場合は、住民側の危機意識の変化、すなわちリスクに対して客観的な立場に変化すれば、行政側の積極的な支援が、脇役としての役割と移り変わることが観察された。この結果は、洪水による氾濫が生じた場合あるいは生じる恐れがある場合、自主的な判断と行動が地域、個人に有効に働くものこと示した。
- ・本章で示した合意のプロセスにおいて、住民側の意見は対策をしてもらおうという立場から、共に考えていく立場の意見に変化した。これは、ソフト対策による身の安全の確保の重要性を認識し、自分たちの問題として捉えはじめていることが時間の過程で顕在化した。これらのプロセスは、基本的に Rowan¹¹⁾の提案した CAUSE モデルや片田等¹⁾の研究とほぼ同じプロセスとなっていることが明らかとなった。
- ・同一圏域においては、人的な被害が発生可能性がある地区が複数あるため、そのような地区を対象に、優先的に対策を展開すること必要である。また、既にこの圏域における地区別避難判断基準を設定しており、今後その啓発活動や、地区住民との意見交換から避難行動に繋げられるための施策を実施していく予定である。このような取り組みが、NHK 大津放送局による放映、京都新聞¹³⁾ ¹⁴⁾、中日新聞等が取り上げたことも、住民の防災・減災対策に対するモチベーションを維持・向上に繋がったものと考えられる。

現状では、ソフト対策の効果が十分に検証されているわけではない。そして、減災対

策の実施から波及し、自主的に本地区で行政支援の下で水害図上訓練を行った。この訓練により、今住んでいる地域にどんな問題が潜在化しているのかを把握するために、これに参加した地域住民からの意見を取りまとめた事項を以下に示す。

- ①一時的な避難所として、2つの寺の利用
- ②避難と自宅待機の判断（逃げ遅れた場合、①の可能性を含めて）
- ③自動車を利用した避難方法
- ④ペットを連れた避難
- ⑤要援護者への避難支援の方法と確認
- ⑥水路に転落しないように、地区内道路にデリネータを設置

これらの新たな課題は、今後検討する必要があるものと考えられる。検討に際しては、高齢者が多く占める地域である点を踏まえ、一般的な避難の考え方に固執せず、柔軟に対応する必要があると考える。

参考文献

- 1) 片田敏孝・金井昌信：土砂災害を対象とした住民主導型避難体制の確立のためのコミュニケーション・デザイン,土木学会土木技術者実践論文集, Vol.1, pp.106-121, 2010.3
- 2) 山田文彦・柿本竜治・山本幸・迫大介・岡裕二・大本 照憲：水害に対する地域防災力向上を目指したリスクコミュニケーションの実践的研究, 自然災害科学, 27-1, pp.25-43, 2008.
- 3) 畑山満則・多々納裕一・川島健一・松本卓也：水害リスクコミュニケーションのための参加者個別ハザードマップ作成システムの開発, 京都大学防災研究所年報, 第49号B, pp.119-129, 2006.4
- 4) 滋賀県：湖北圏域水害・土砂災害に強い地域づくり協議会（以下URL参照）
(<http://www.pref.shiga.jp/h/kako/bousai/suigainitsuyoi/setsumei.html>)
- 5) 滋賀県：滋賀県流域治水基本方針－水害から命を守る総合的な治水を目指して－, 2012.3
- 6) 滋賀県土木交通部流域政策局：水害情報発信－水害の記録と記憶－
(<http://www.pref.shiga.jp/h/ryuiki/hanran/index.html>)
- 7) 滋賀県土木交通部流域政策局：姉川, 高時川浸水想定区域図, 2007.6
(<http://www.pref.shiga.jp/h/kako/bousai/shinsuisoutei/shinsuisoutei.html>)
- 8) 瀧健太郎, 松田哲裕, 鵜飼絵美, 小笠原豊, 西島照毅, 中谷恵剛：中小河川群の氾濫域における減災型治水システムの設計, 河川技術論文集, 第16巻, pp.477-482, 2010.6
- 9) 佐藤智, 今村文彦, 首藤伸夫：洪水氾濫の数値解析および家屋被害について－8610号台風による吉田川の場合－, 水理講演会論文集, 第33巻, pp.331-336, 1989.
- 10) 河田恵昭, 中川一：三隅川の洪水災害－洪水氾濫と家屋の被害－, 京都大学防災研究所年報, 第27号B-2, 1984.
- 11) Rowan, K.: Why rules for risk communication are not enough: A problem-solving approach to risk communication, Risk Analysis, 14, pp.365-374, 1994.
- 12) 佐々木昌俊・田中耕司・花房大輔・北村祐二：経験的な危険箇所を利用した避難判断基準の設定, 土木学会論文F6, Vol.67, No.2, pp.147-152, 2012.1
- 13) 相見昌範（京都新聞記者）：まち全体ハザードマップに, 京都新聞 滋賀地域・総合, 2011.10.8
- 14) 相見昌範（京都新聞記者）：お年寄りの経験を生かし水害減災, 京都新聞 滋賀地域・総合, p.22, 2011.10.24

第 6 章 吉井川水系を対象にした洪水予測システムにおけるデータ同化手法とダム操作支援を反映したシステム構築

6.1 はじめに

近年，局地的な豪雨や台風の襲来によって，浸水被害が発生している．このような，自然外力に対する河川管理上の備えとして，河川管理者が水防体制や洪水予報を発令するための洪水予測システムが導入されてきた．さらに，統一河川情報システムが開発され，全国の雨量，河川水位のデータを一元的に集約し，この基礎データを防災活動に利用できるように推進している¹⁾．

一方，河川整備の現状としては，計画規模に達していない河川がほとんどである．そのため，ダム等で洪水調節を行っても，下流の河道の整備が遅れば，ダムによる効果も限定的なものとなる．そのため，最近では，下流の状況に応じた臨機応変に操作を行い，下流の浸水防止あるいは浸水被害の軽減に寄与する事例^{2),3)}がある．

さて，洪水予測の精度は，当然のことながら，担保されないと本章で対象にするシステムの構築は難しいものと考えられる．従来から，洪水を予測しダム等の河川管理施設の操作の最適化を目的とした研究が行われてきた．

洪水を予測する際に，観測値に対する予測値の補正方法を適切に選択する必要がある．この方法については，多くの研究成果が発表され，現在実用化されてきている．例えば，日野⁴⁾は，水文流出モデルの係数を最適化するためにカルマン・フィルター理論を応用している．最近では，佐山ら⁵⁾が分布型流出予測システムの状態量を観測流量で補正する方法を提案している．この方法は，バイアス補正カルマン・フィルターをマスキングガムクレンジ法に適用して，実河川での洪水を予測検証し，精度の良い結果を得ている．現在，実流域で運用されている洪水予測システムは，これらの研究を参考に活用され，予測モデルの精度向上が図られている．

さらに，ダム操作の最適化に関する研究も多い．高棹ら⁶⁾は，ダム群の水量制御の最適解を求めるために DP (Dynamic Programming) を利用して，その有効性について議論している．さらに，佐山ら⁷⁾は，分布型流出モデルを用いた場合の貯水池制御最適化シミュレータを開発し，淀川水系の木津川水系流域に適用し，超過洪水に対する治水効果を発揮するダム群操作について検討し，現行規則操作とは異なる操作方法が選択され

る結果を示している。この結果は、下流の状況に応じたダム操作の最適解を算定できることを示唆しているものと考えられる。しかしながら、計算時間を要するこれらの研究は、実運用上適用性が非常に難しい反面、ここ最近の計算機の能力の向上による洪水予測の高速化とダム操作支援が可能なる環境が担保されつつあることに期待したものであると考えられる。

その一方で、水系一貫とした洪水予測システムに関する事例としては、立川らが⁸⁾構築した淀川水系を対象にした分布型洪水予測システムがある。このシステムは、河川水位・流量のみならず、ダム放流量や貯水池水位も予測するものである。しかしながら、実際のダム管理においては、まだ最適操作のシミュレータで操作の意思決定する段階ではなく、概ね 10 分程度の計算間隔で予測結果を提供する洪水予測システムの導入が始まったばかりである。さらに、洪水予測システムで様々な判断をするのは、河川を直接管理する立場にある国・県の出先機関であり、八田原ダム²⁾や淀川水系名張川筋の 3 ダムの操作³⁾は、今後のダムの操作の姿の先進事例であることから、まだ一般的なものとは考えにくい。実際のダム運用、水系の洪水予報といった高水管理における時間制約がある中で、まだ十分な洪水予測モデルの精度を確保するための技術的な対応、モデルを用いた下流河道の水位上昇や氾濫なども考慮できるダム操作支援機能を持つシステムのあり方について研究された事例はない。

そこで、本章では、洪水予測システムと連動したダム管理支援システムの開発を行うに当たり、システムでの演算結果の精度を向上させるために、定数の同定とフィードバック手法の適用について論じる。次に、洪水予測システムと連動したダム操作支援システムの基本的な考え方と構築内容について述べる。

6.2 対象流域の概要

本章では、図 6.2.1 に示す吉井川水系をモデル流域として洪水予測システムとダム管理支援システムの設計・構築の対象とした。

吉井川⁹⁾は、流域面積 2,110km²、幹線流路延長 133km、の河川であり、流域における年平均降水量は約 1,700mm で全国平均と同程度である流域である。吉井川における想定

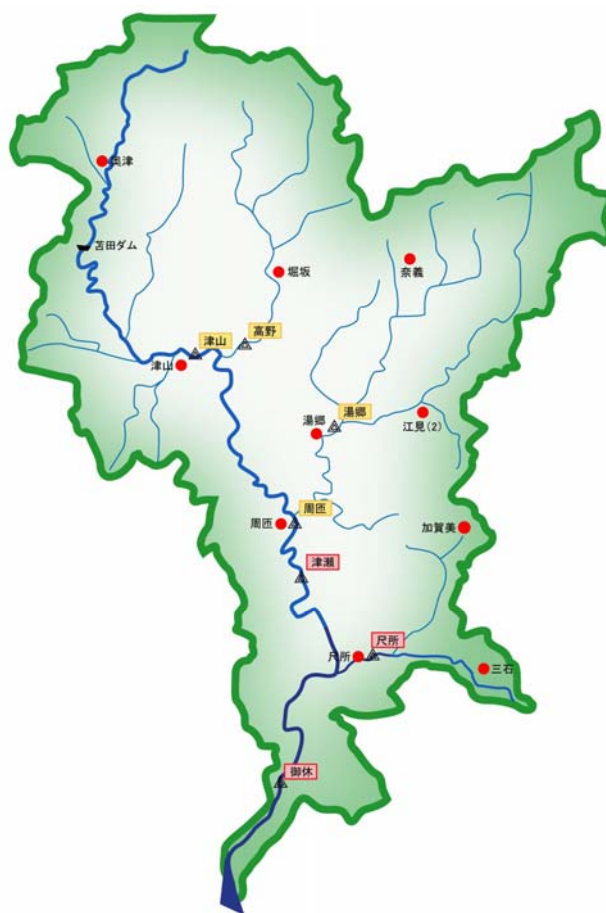


図 6.2.1 吉井川水系の流域

氾濫区域内人口は約 14 万人である。また、河口から 5km 付近までは、新田開発を目的した干拓により低平地が広がり、一度氾濫したら甚大な被害が発生する流域である。

6.3 洪水予測モデルの適用

6.3.1 分布型流出モデルの概要

本章では、流域をメッシュに分割し、レーダ雨量、予測雨量等のメッシュ情報をそのまま利用できる分布型流出モデル¹⁰⁾を用いることとした。

分布型流出モデルの単位メッシュは流出モデルと河道モデルにより構成され、雨量メッシュサイズとあわせて 1km メッシュで分割した。メッシュは流域モデルと河道モデルからなり、図 6.3.1 に示す流域モデルで地表流、地下水流を解析し、河道モデルは洪水流を解析するものである。流域モデルの上部にある表層モデルは矩形斜面（単位メッシュを傾けた斜面）とし、単位メッシュ内の土地利用が単一でない場合には、同一の斜

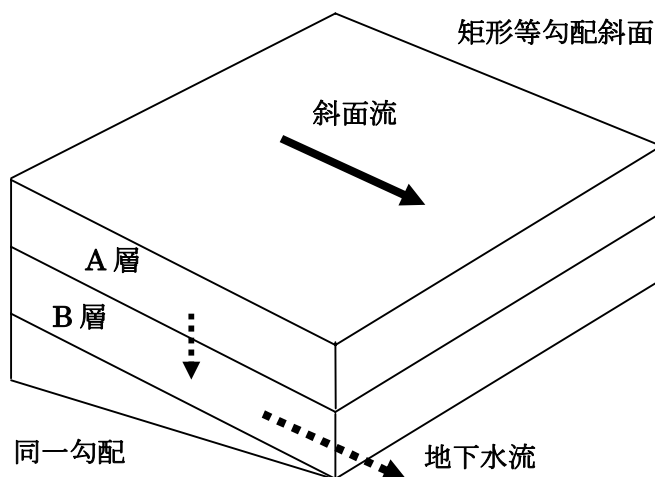


図6.3.1 流出モデルの基本構造

面長として、斜面幅は土地利用率に比例する短冊状構造とした。

表層モデルの下は、地下水モデルを配置し、洪水の初期貯留と、緩やかな地下水流出を表現している。

(1) 表層モデル

雨量を表面流、早い中間流、地下浸透流に分離するモデルで、上から 1 番目の孔が表面流、2 番目の孔が早い中間流、下の孔が地下浸透である。表面流は Manning 則が成り立つものとし、流出量は貯留高の $5/3$ 乗に比例するものとする。早い中間流は便宜的に貯留高に比例するものとした。また、地下浸透は Darcy 則に従い、浸透量は貯留高に比例するものとする。基礎式は次のとおりである。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = r - E_{ps} - Q_{sf} - Q_o - Q_{ri} \quad (S_{f2} \leq h) \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = r - E_{ps} - Q_o - Q \quad (S_{f1} \leq hS_{f2}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = r - \frac{E_{ps}}{S_{f1}} h - Q_o \quad (S_{f0} \leq hS_{f1}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = r - \frac{E_{ps}}{S_{f1}} h \quad (h \leq S_{f0}) \quad (4)$$

ここに、 r は雨量、 Q_o は地下水モデルへの浸透量、 E_{ps} は蒸発散量、 Q_{sf} は表面流出量、 S_{f2} は表面流の発生する高さ、 Q_{ri} は早い中間流出量、 S_{f1} は中間流の発生する高さ、 h はモデルの貯留高、 S_{f0} は地下浸透の発生する高さである。

地下浸透量は、モデル上の貯留高が表面流の発生する高さと同じ場合に、浸透能数が飽和透水係数が等しいものとして、 f_0 を終浸透能、 A をメッシュの面積として式(5)および(6)で与えられる。

$$Q_o = \alpha_0 (h - S_{f0}) A \quad (5)$$

$$\alpha_0 = \frac{f_0}{(S_{f2} - S_{f0})} \quad (6)$$

早い中間流の流出量は、モデル内の貯留高に比例するものとし、 α_{ri} を経験定数として式(7)で与えられる。

$$Q_{ri} = \alpha_{ri} \alpha_0 (h - S_{f1}) A \quad (7)$$

表面流の流出量は、土地利用別に粗度係数(N)を設定し、 L 斜面長として、式(8)で与えられる。

$$Q_s = \beta (h - S_{f2})^{5/3} \quad (8)$$

$$\beta = \frac{1}{N} i^{1/2} L \quad (9)$$

(2) 地下水モデル

上段の流出孔は不圧地下水の流出、下段の流出孔は被圧地下水の流出を表している。被圧地下水の流出は h に比例し、不圧地下水の流出は h の 2 乗に比例するものとしている。ここに、 Q_{in} は浸透モデルからの流入量、 h はモデルの貯留高、 Q_{gl} は不圧地下水の流出量、 S_g は不圧地下水流出が発生する高さおよび Q_{q2} は被圧地下水の流出量を表している。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = Q_{in} - Q_{s1} - Q_{s2} \quad (h \geq S_g) \quad (10)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = Q_{in} - Q_{s1} \quad (h < S_g) \quad (11)$$

不圧地下水、被圧地下水の流出量は、以下の式(12)及び式(13)で与えられる。ここに、 A_u および A_q は、不圧、被圧地下水の流出量にかかる係数である。

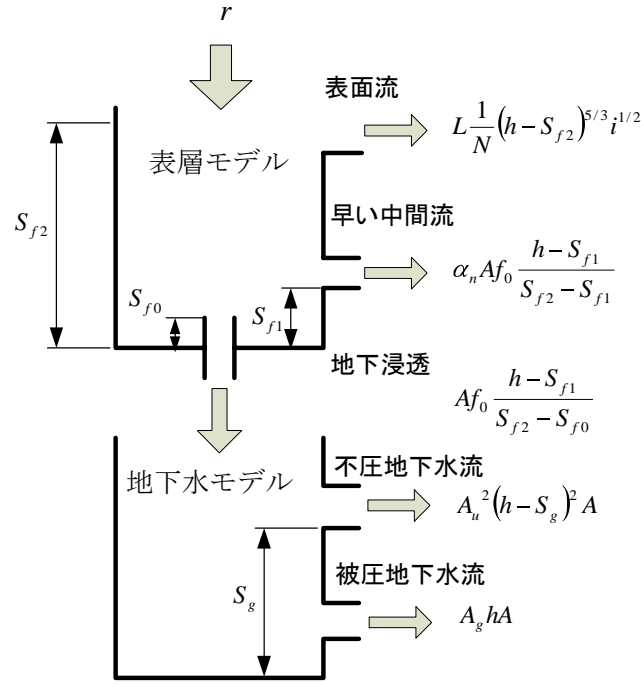


図 6.3.2 分布型モデルの概念図

$$Q_{q1} = A_u^2 (h - S_g)^2 A \quad (12)$$

$$Q_{g2} = A_g h A \quad (13)$$

(3) 河道モデル

河道モデルは流域モデルで計算した河道流入量を受け入れて、矩形河道を仮定し、式(14)の Kinematic Wave を用いて洪水追跡をするものである。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q(t, x) \quad (14)$$

ここに、 A は河道の断面積、 Q は流量、 $q(t, x)$ は横流入、 t は時間、 x は流下方向の距離である。

6.3.2 分布型流出モデルの同定

洪水流出に大きく寄与するパラメータは、表層モデルの透水係数と地下水モデルの不圧地下水係数であることから、これらの係数について SCE-UA 法（最適探索方法）¹¹⁾ で定数を推定した。この SCE-UA 法は、ランダムに定数を発生させ、最適な定数が存在すると考えられる範囲を想定し、最適定数を探索する方法である。図 6.3.3 には探索の流れを、図 6.3.4 には SCE-UA 法のアルゴリズムを含めた最適なパラメータを算出するまでのプロセス、図 6.3.5 には SCE アルゴリズムの流れを示す。この方法から、3つの誤差（ピーク誤差、波形誤差、ボリューム誤差）による指標が最小になるように探索を行った。なお、探索の指標値は、式(15)、(16)および(17)に示すピーク誤差、波形

誤差，流出ボリューム誤差の和とした．

1) ピーク誤差

$$E_p = \frac{Q_{op} - Q_{cp}}{Q_{op}} \quad (15)$$

ここに， E_p はピーク誤差， Q_{op} は実績流量の最大値， Q_{cp} は計算流量の最大値である．

2) 波形誤差

$$E_w = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_o - Q_c}{Q_o} \right)^2 \quad (16)$$

ここに， E_w は波形誤差， Q_o は実績流量， Q_c は計算流量である．

3) ボリューム誤差

$$E_v = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_o - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_c}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_o} \quad (17)$$

ここに E_v はボリューム誤差， Q_o は実績流量， Q_c は計算流量である．

誤差評価地点は苫田ダム地点とダムの放流の影響がある下流津山、津瀬地点とした．最適探索を用いて設定した表層モデルの定数を表 6.3.1，地下水モデルのそれを表 6.3.2 に示す．なお，表中の網掛けは，他の河川の事例を参考に定数を設定したものを適用し，実績データからほぼ妥当なものであると判断した．

図 6.3.6～図 6.3.11 は，近年の代表的な洪水である平成 18 年 7 月洪水，平成 23 年 7 月洪水の実績流量と計算流量を比較した結果を示している．なお，これらの洪水による氾濫は発生していない．これらの結果によれば，原，湯郷，高野地点においては，実績に対して推定した定数での説明が難しい．これは，3 地点において流量観測が実施されていないため，水位流量の変換，すなわち HQ 式の精度によるところが大きいと考えられる．それ以外の流量観測を行っている地点においては，推定した定数で流量を再現することができており，モデルの精度が高いことがわかる．この結果より，苫田ダム地点より下流の周匝，津山および津瀬地点においては，分布型流出モデルの定数が，実績流量との整合から概ね妥当であると判断した．なお，この段階では，津山地点のように誤差が発生している場合もある．これらの要因は，HQ 式の精度が十分でないことも考えられるが，その検証ができないため，後述するフィードバック手法を適用して，洪水履歴データから現時刻の流出量を調整し，洪水予測モデルとしての精度を向上させることとする．

表 6.3.1 表層モデルの定数

分 類		透水係数 k (cm/s)	モデルの高さ(mm)			等価粗度 係数 N	早い中間流 係数 α
			S_{f2}	S_{f1}	S_{f0}		
森林	浸透性大	2.0×10^{-3}	60	35	15	0.6	0.05
	浸透性中	2.0×10^{-4}	45	25	10	0.6	0.03
	浸透性小	5.0×10^{-5}	30	15	5	0.6	0.01
水田		1.0×10^{-6}	75	15	05	1.0	3.0
畑地		5.0×10^{-6}	30	15	10	1.0	3.0
市街地		1.0×10^{-6}	20	15	5	0.005	3.0

表 6.3.2 地下水モデルの定数

分 類		不圧地下水係数 ($\text{mm}^{-1/2}\text{day}^{-1/2}$)	被圧地下水係数 (day^{-1})	被圧地下水層の 高さ(mm)
浸透性大	上流	1.60	6.0×10^{-4}	300
	下流	0.06	3.0×10^{-4}	300
浸透性中	花崗岩	0.02	10.0×10^{-4}	800
	その他	0.20	6.0×10^{-4}	500
浸透性小	火山性岩類	0.30	1.0×10^{-4}	500
	半固結～固結堆積物	0.20	6.0×10^{-4}	500

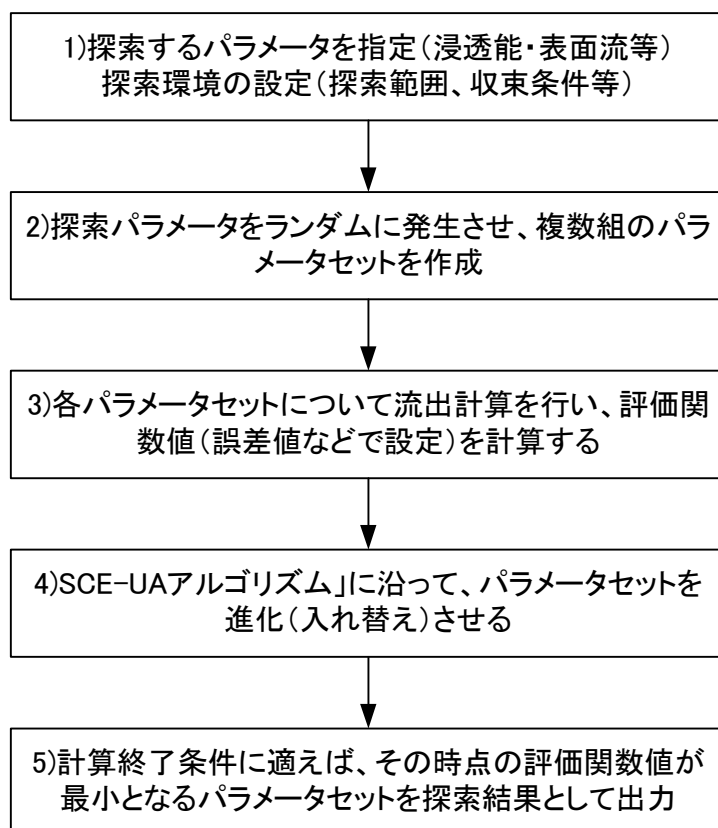


図 6.3.3 パラメータの最適解を求める流れ

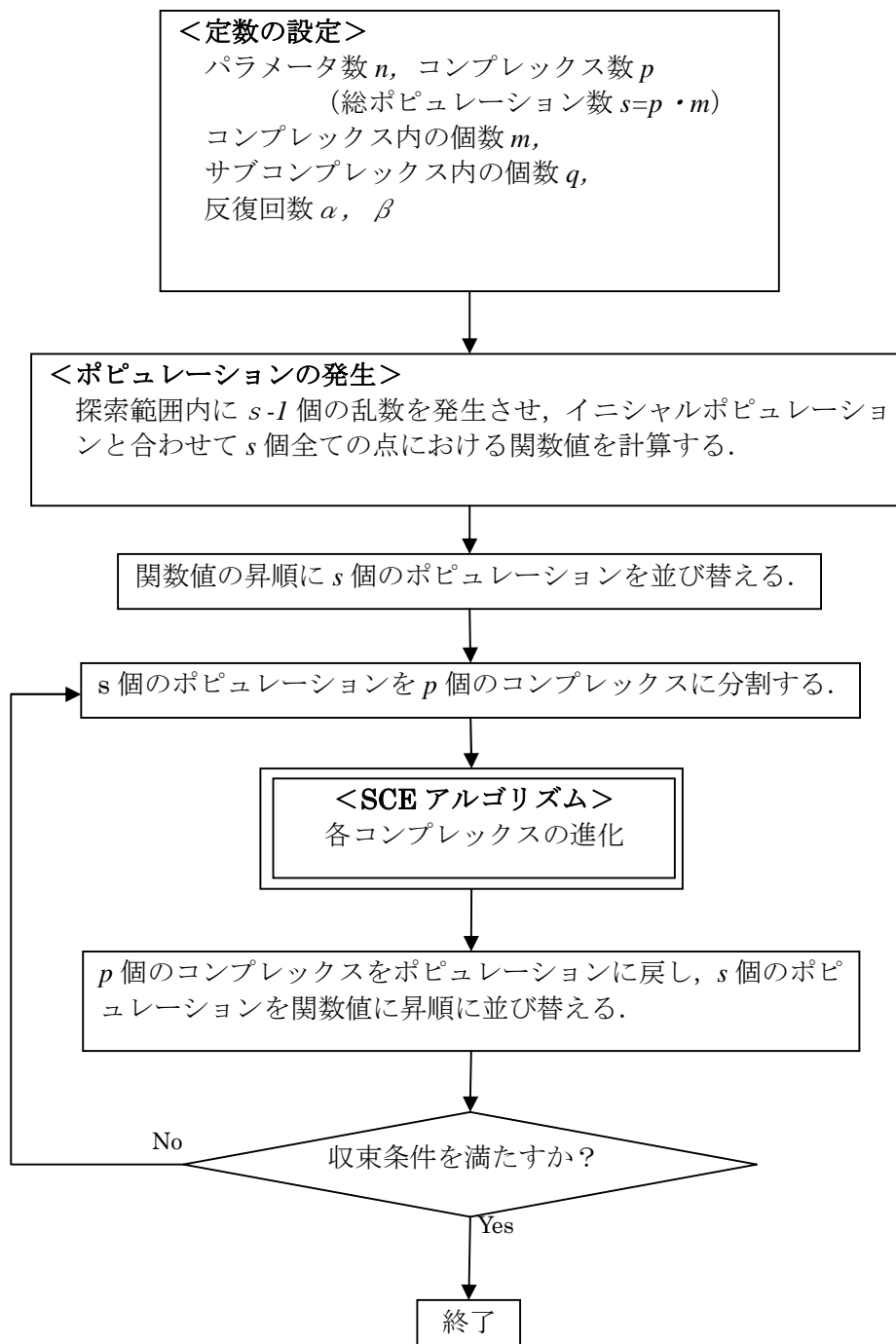


図 6.3.4 パラメータの最適解を求める全体のプロセス

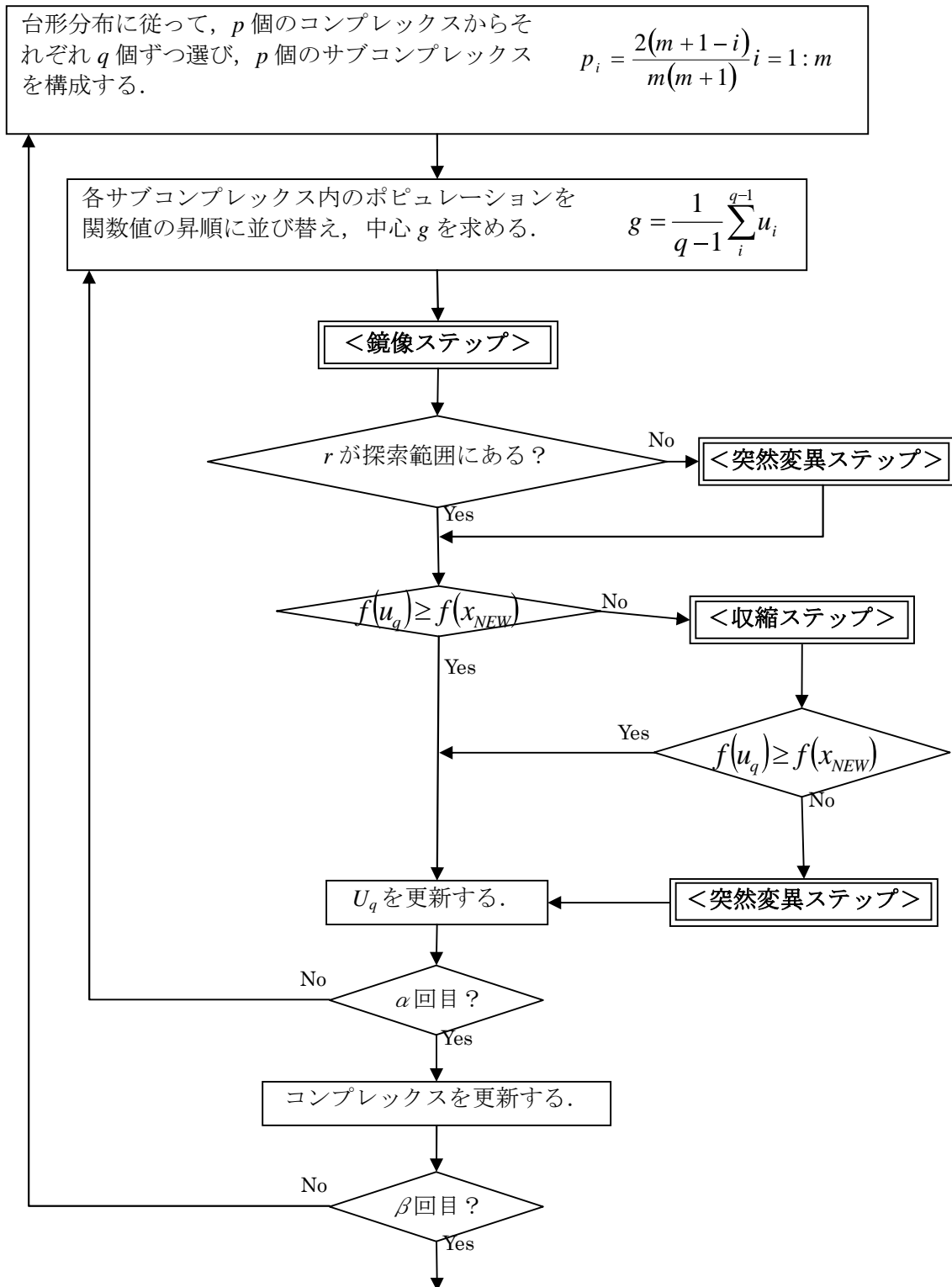


図 6.3.5 SCE アルゴリズム

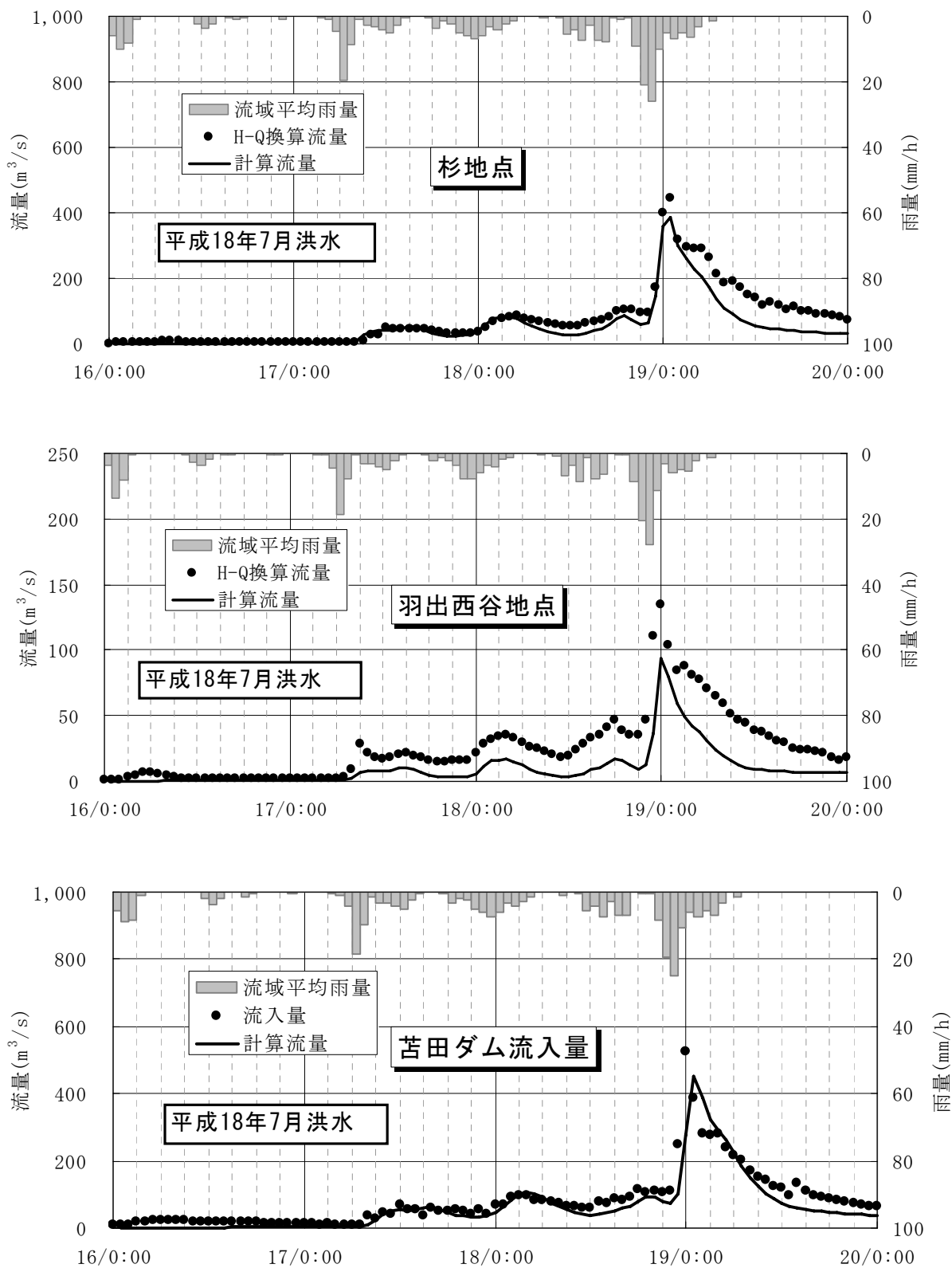


図6.3.6 平成18年7月洪水の同定結果

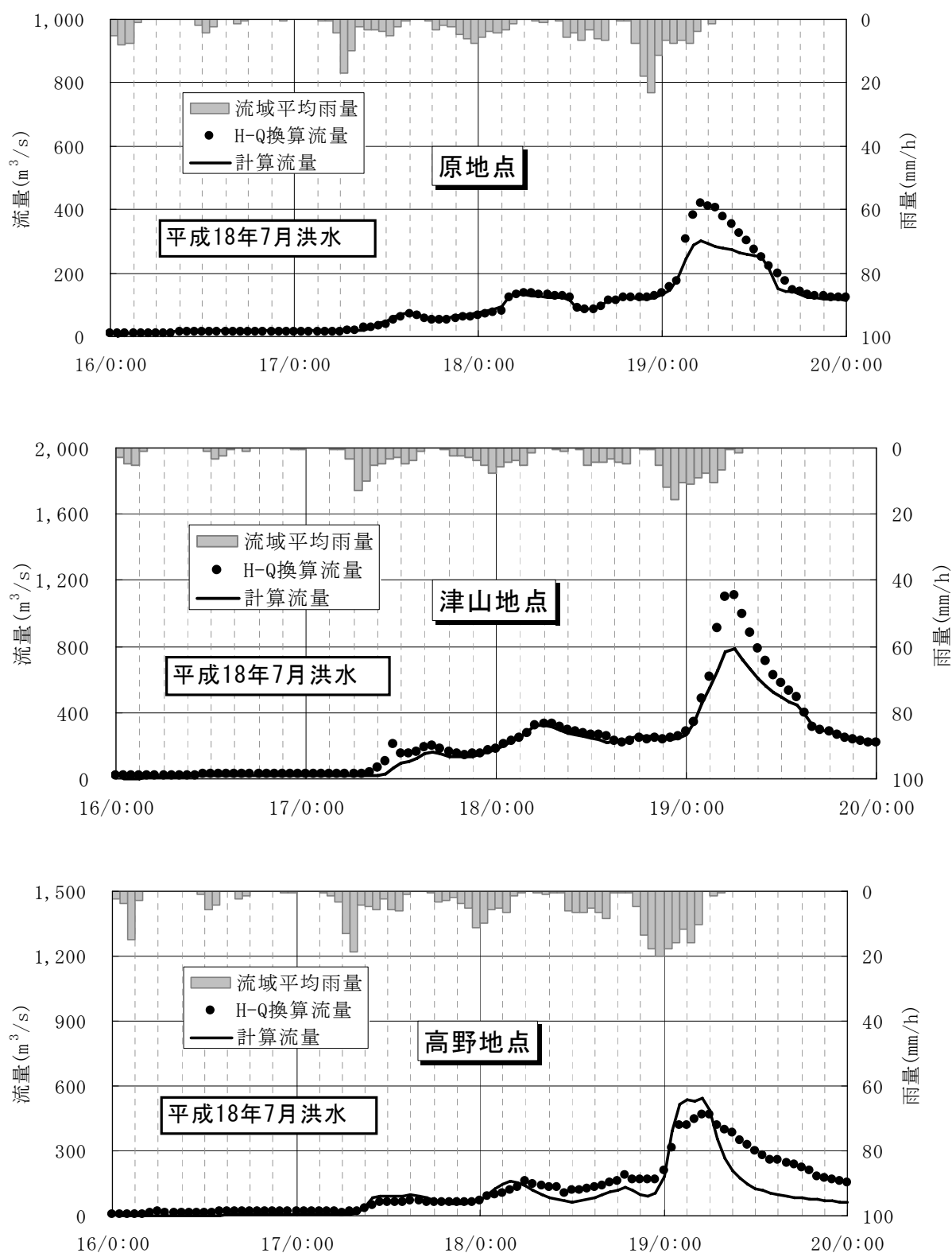


図6.3.7 平成18年7月洪水の同定結果

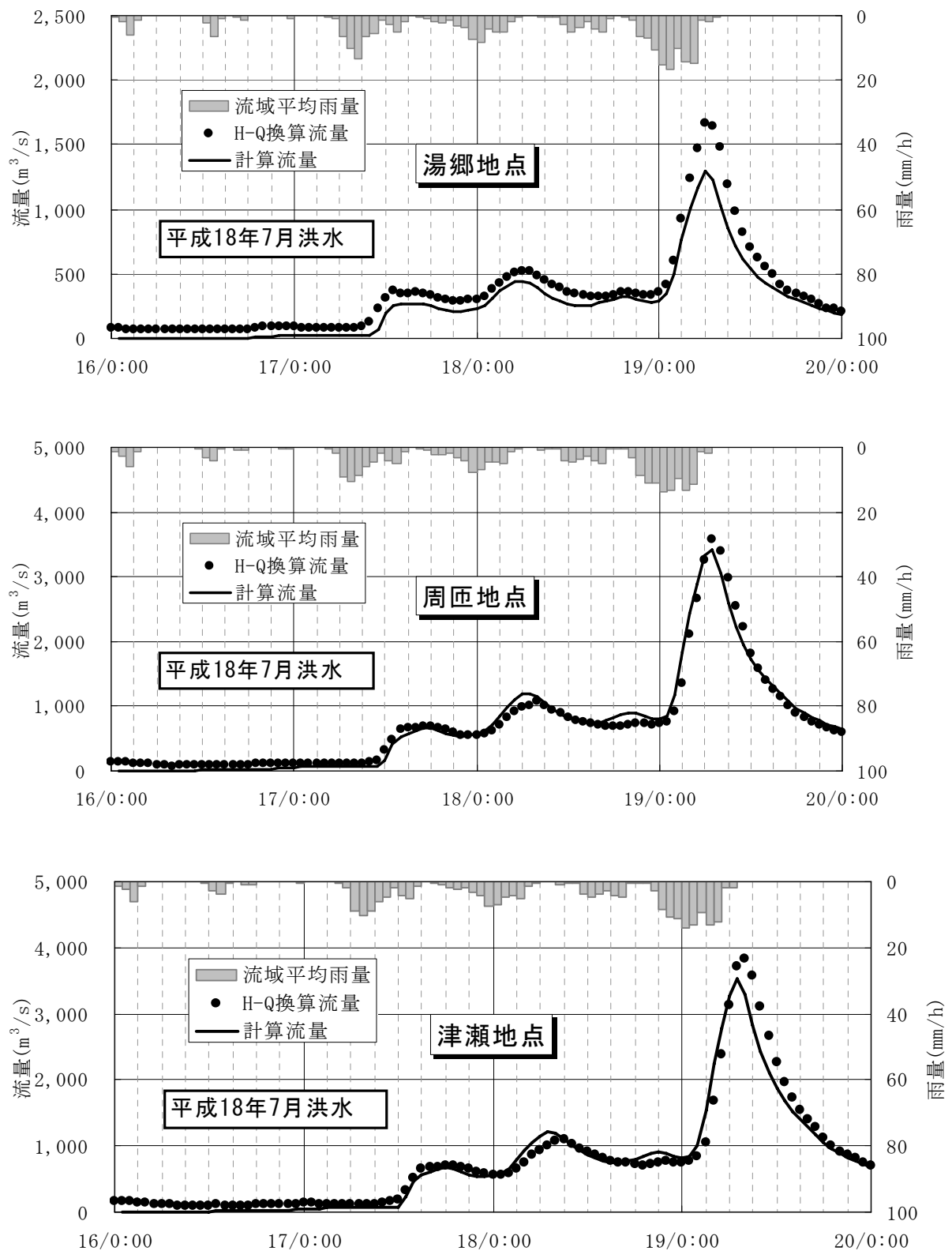


図6.3.8 平成18年7月洪水の同定結果

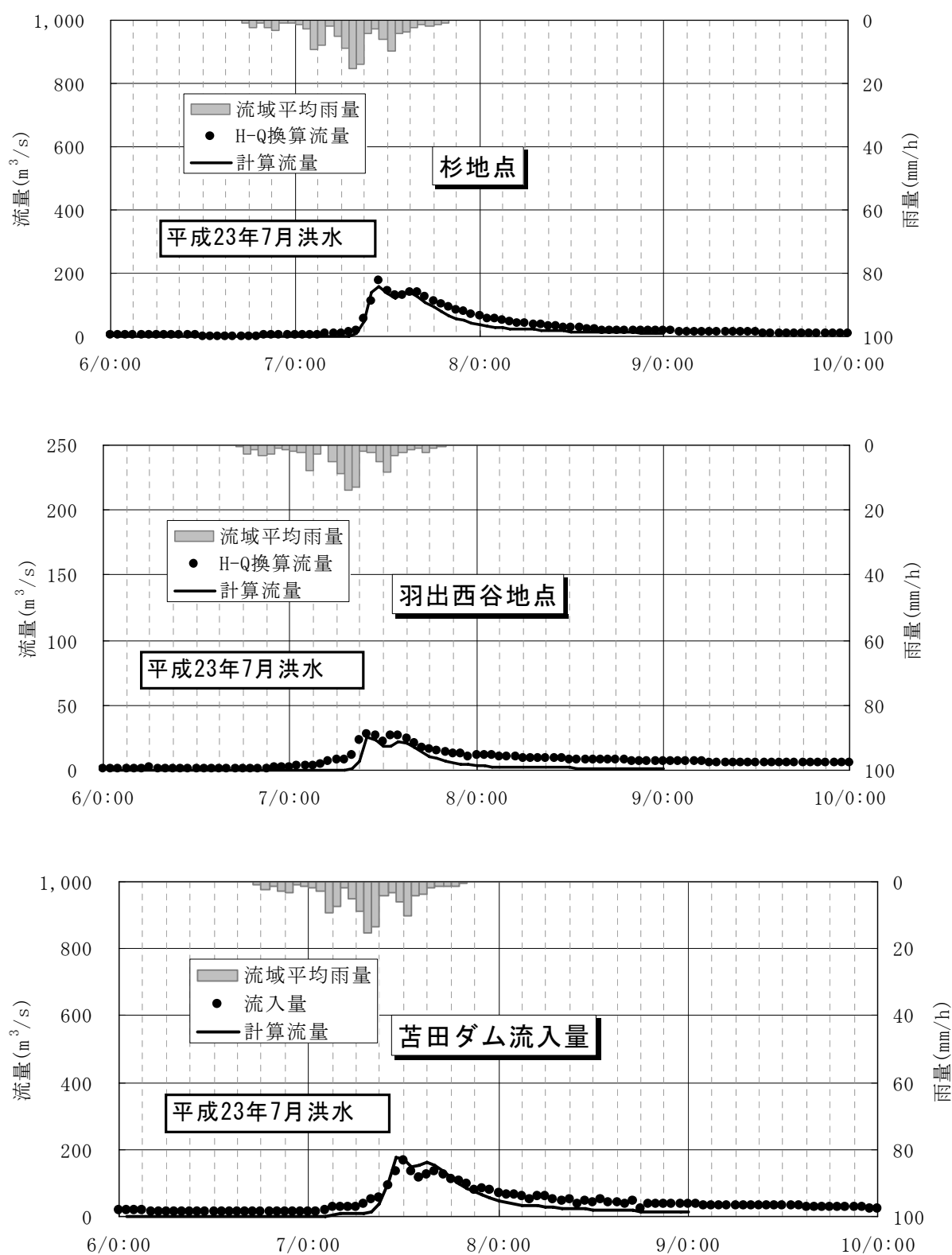


図6.3.9 平成23年7月洪水の同定結果

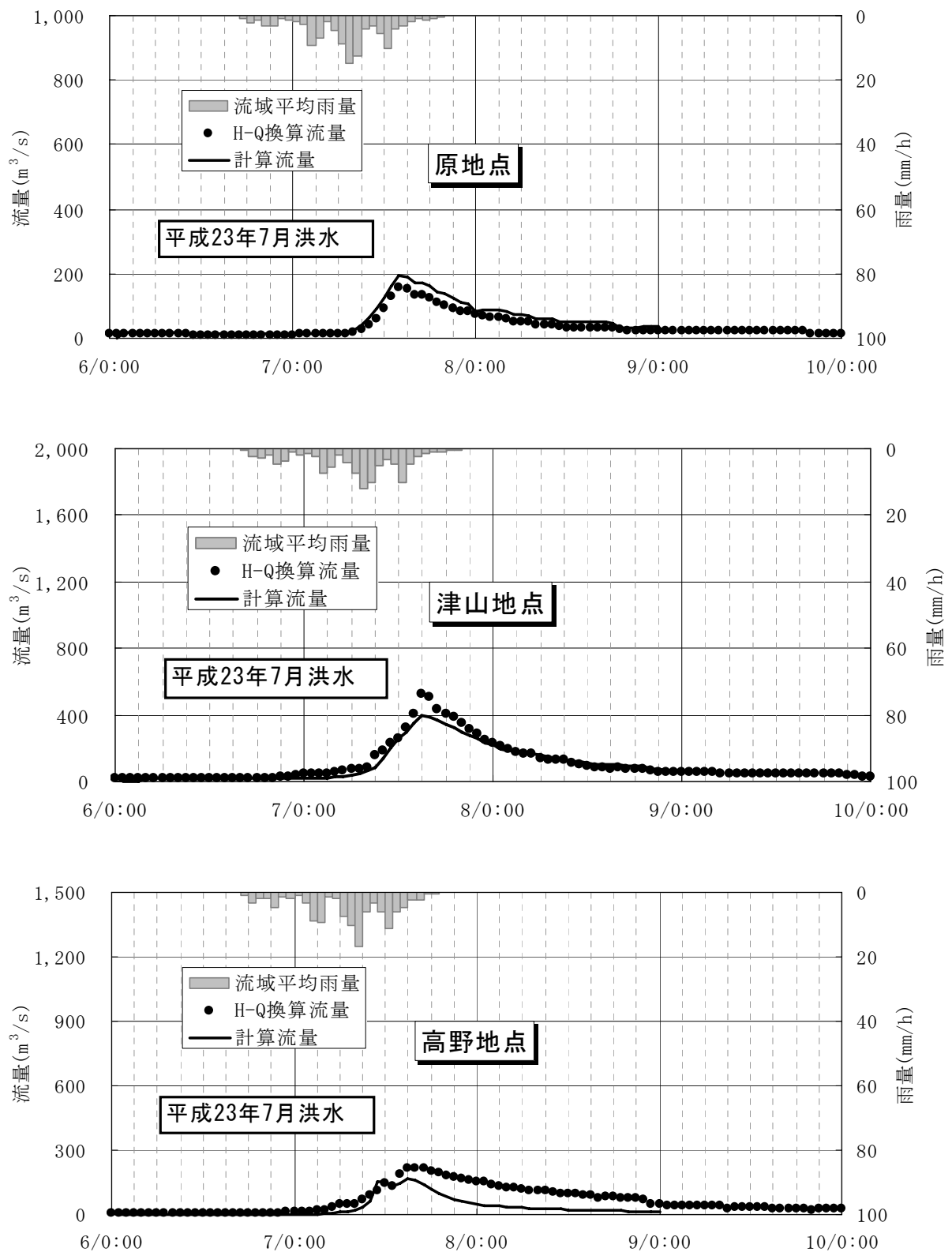


図6.3.10 平成23年7月洪水の同定結果

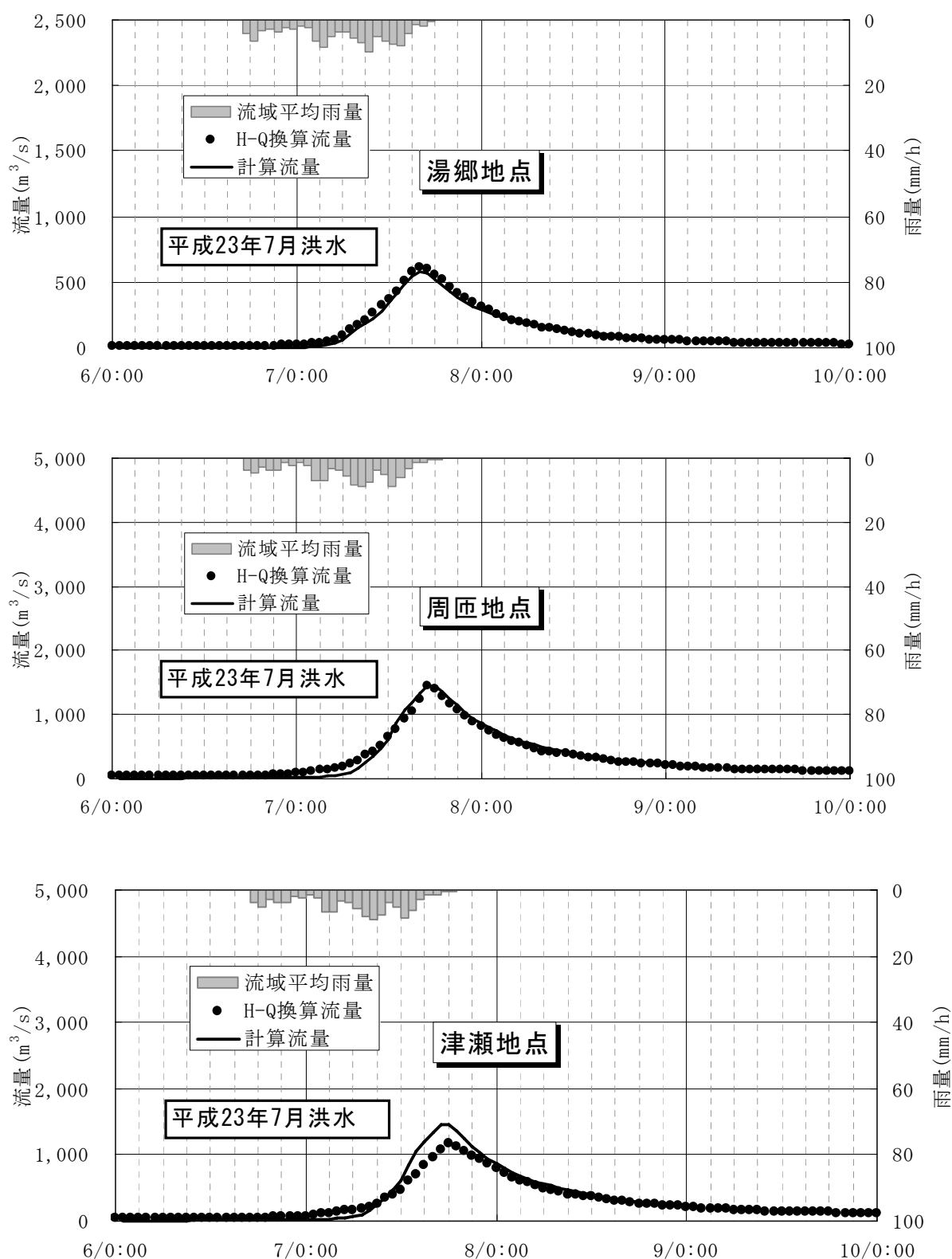


図6.3.11 平成23年7月洪水の同定結果

6.4 洪水予測におけるフィードバック手法の開発

洪水予測においては、現時刻までの実測データに合わせた状態を想定した上で、現時刻の状態を調整する。一般にこの方法をフィードバックという。フィルタリングを使用しないで、観測値に合わせるために、解析結果に対して現時刻の流量誤差分を解析結果に上乗せする方法があり、多くの河川で使用されている。簡便であるが実測データと解析データの乖離が大きい場合は、予測精度が低下する場合がある。この方法は、短い時間では有効であるが、ダム操作に必要な 24 時間程度の長時間の予測には適用できない。流域の規模にもよるが、現時刻の誤差が継続するのは数時間程度までで、特にピーク付近では誤差の継続時間は短くなる。このため、現時刻に近い時刻は現時刻の誤差が継続し、継続時間が長くなると解析結果に近づくように改良を試みた。

フィルタリングを用いた手法にカルマン・フィルター法⁴⁾⁵⁾¹²⁾、粒子フィルタ法¹³⁾¹⁴⁾がある。粒子フィルタ法は複雑なシステムを対象に任意の誤差分布でフィルタリングできるように北川¹⁵⁾が提案したものである。多くの粒子でシステム誤差と観測誤差を近似し、カルマン・フィルター法のようにシステムの局所的な線形化、大幅なプログラムの書き換えを必要としない。本章では、誤差の上乗せ法と粒子フィルタ法について比較し、その精度を検証することとした。

6.4.1 改良誤差上乗せ法

ダム運用では 24 時間程度の長時間の予測が必要となるが、24 時間先まで、現時刻の誤差が継続するとは考えにくい。過去における流量変動が大きい時は洪水時であり、現時刻の誤差は将来の予測にはほとんど影響せず、予測値は解析結果に近いと考える。一方、流量変動が小さい時は主に低水時であるため、現時刻の流量誤差が将来も継続すると考える。

本章では、流量の変動状況を実績流量と解析流量の変動係数の積で表し、変動係数の大小で誤差の継続性を変化させるものとした。実績流量の変動係数として過去 6 時間の流量の標準偏差を平均値で割ったものを定義し、さらに解析結果の変動係数として過去 6 時間から将来 6 時間までの流量の標準偏差を平均値で割ったものを定義した。

$$V_o = \frac{S_o}{m_o} \quad m_o = \frac{\sum_{t-6hr}^t Q_o(t)}{6hr} \quad S_o = \sqrt{\frac{\sum_{t-6hr}^t \{Q_o(t) - m_o\}^2}{6hr}} \quad (18)$$

$$V_c = \frac{S_c}{m_c} \quad m_c = \frac{\sum_{t-6hr}^{t+6hr} Q_c(t)}{6hr} \quad S_c = \sqrt{\frac{\sum_{t-6hr}^{t+6hr} \{Q_c(t) - m_c\}^2}{6hr}} \quad (19)$$

ここに、 V_o は実測流量の変動係数、 V_c は解析結果の変動係数、 Q_o は実測流量、 Q_c は解析流量である。実測調整で使用する変動係数は、式(20)のように実績流量と解析流量の変動係数の相乗平均（積の平方根）とした。

$$V_{oc} = \min(\sqrt{V_c V_o}, 1) \quad (20)$$

以上の考察から、式(21)および(22)の補正を行った。実績流量が解析流量より小さい

場合は比率で縮小し、逆に大きい場合、誤差を上乗せする方法である。これは、解析流量を縮小する場合には、誤差を差し引くと解析結果がマイナスになる不合理を解消するためである。また、実績流量が解析流量より大きい場合は、比率で割増すと流量増加時には過大な予測となる傾向があるためである。

1) $Q_o(t) \leq Q_c(t)$ のとき 実績流量が計算流量より小さい場合

$$Q_o(t+i) = Q_c(t+i) \times FF \quad FF = 1 - \frac{Q_c(t) - Q_o(t)}{Q_c(t)} \left\{ 1 - \frac{T-i}{T} V_{oc} \right\} \quad (21)$$

2) $Q_o(t) > Q_c(t)$ のとき 実績流量が計算流量より大きい場合

$$Q_o(t+i) = Q_c(t+i) + DQ \quad DQ = \{Q_c(t) - Q_o(t)\} \left\{ 1 - \frac{T-i}{T} V_{oc} \right\} \quad (22)$$

ここに t は現時刻、 i は予測時間として、予測時間を $T = 12hr$ とした。

6.4.2 粒子フィルタ法

(1) 基礎方程式

状態量(x_t)を観測値(y_t)により推定し、将来予測を行うシステムを想定する。洪水予測においては状態量はモデル定数、分布型流出モデルの水分量等である。ここでは状態量を x_t と示し複数の状態量を表現する行列を考えている。また観測値 y_t はリアルタイムで取得した水位、流量と考えている。観測値は $y_{1:t}$ と表現し、1～ t 時刻までの観測値を示しているが、これは「過去のすべてのデータを使用した」ということを示しており、具体的に期間を決めているわけではない。

観測値から推定した状態量 x_t が観測値 $y_{1:t}$ で最適化された条件付き確率分布を $p(x_t | y_{1:t})$ (フィルタ分布)で式(24)に示す。また、一期先の予測を行った分布を $p(x_t | y_{1:t-1})$ (予測分布)を式(23)に示す。現時刻(ここでは $t-1$)における最適な状態量から1期先の状態量の確率分布を示したものである。

一期先の予測分布

$$p(x_t | y_{1:t-1}) = \int p(x_t | x_{t-1}) p(x_{t-1} | y_{1:t-1}) dx_{t-1} \quad (23)$$

現時刻のフィルタ分布

$$p(x_t | y_{1:t}) = \frac{p(y_t | x_{t-1}) p(x_t | y_{1:t-1})}{p(y_t | y_{1:t-1})} \quad (24)$$

ただし $p(y_t | y_{1:t-1}) = \int p(y_t | x_t) p(x_t | y_{1:t-1}) dx_t$

$\delta(x)$ はディラクのデルタ関数で $x=0$ のときに1、 $x \neq 0$ のときに0を示す。一期先の予測分布で $p(x_t | x_{t-1})$ は時間を更新することである。現時刻のフィルタ分布はベイズの定理そのもので左辺が事後分布で、右辺の $p(x_t | y_{1:t-1})$ を事前分布、 $p(y_t | x_{t-1})$ を尤度となる。

粒子フィルタは予測分布 $p(x_t | y_{1:t-1})$ 、フィルタ分布 $p(x_t | y_{1:t})$ に式(25)および(26)を代入することにより得られる。 \approx は右辺の積分が1になるように調整することを示している。

$$p(x_t | y_{1:t-1}) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(x_t - x_{t,t-1}^{(i)}) \quad (25)$$

$$p(x_t | y_{1:t}) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(x_t - x_{t,t}^{(i)}) \quad (26)$$

(2)粒子フィルタの設計

複数のパラメータをフィルタリングできる特徴を生かして、図 6.4.1 のとおり粒子は 6 時間前の状態量の修正量と降雨にかかる補正係数の 2 つとする。また、立川らは⁸⁾粒子の数を 1,000 個以上とすると安定的な予測結果が得られると指摘しているが、1,000 個との計算結果に比べほとんど変わらない結果となったので 100 個を採用した。

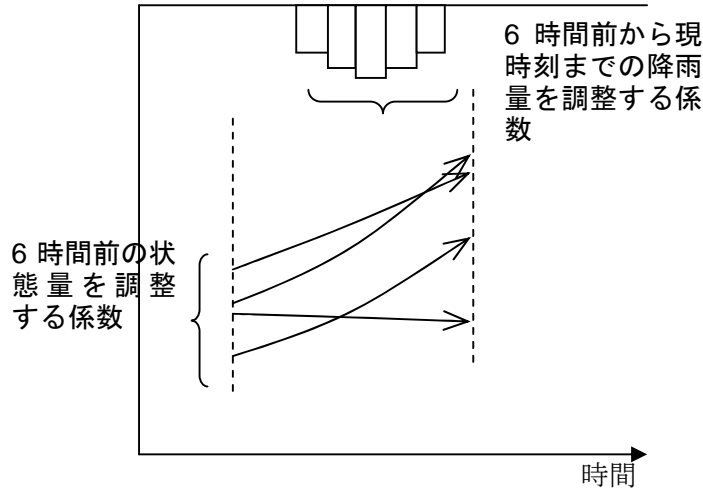


図 6.4.1 粒子フィルタの概要

(3)誤差分布の設定

現時刻の流量データで誤差を評価する方法として、現時刻の急激な変動が結果に影響を及ぼす可能性がある。このため、過去 6 時間の実測値に対する 2 乗誤差を算定し、誤差分布 $P(Q_c(t, i))$ が自由度 1 のカイの分布に従うものと仮定した。ここに、 \hat{D} は誤差分布の期待値で観測流量の 1 割とした。

$$P(Q_c(t, i)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\hat{D}}} \exp\left(-\frac{D(t, i)^2}{2\hat{D}^2}\right) \quad (27)$$

$$D(t, i)^2 = \frac{1}{b} \sum_{t=1}^{18} \exp(-at)(Q_o(t) - Q_c(t, i))^2 \quad (28)$$

ここに $Q_o(t)$ は観測流量、 $Q_c(t, i)$ は t 時刻 i 番目の粒子の解析結果、 a は定数である。フィルタリングによる予測流量の期待値 $\hat{Q}_c(t)$ は、誤差分布の加重平均となり、式(29)のように表される。

$$\hat{Q}_c(t) = \sum_{i=1}^{100} P(Q_c(i)) Q_c(t, i) \quad (29)$$

(4)粒子のリサンプリング

粒子は、適合度で重みを持っているので、次ステップに向けて分布形を変更しないで、粒子の重みを変更する。この方法に図 6.4.2 のとおり、粒子の重みを順番に並び替えて、重みの大きい方から順にサンプリングする方法を採用した。

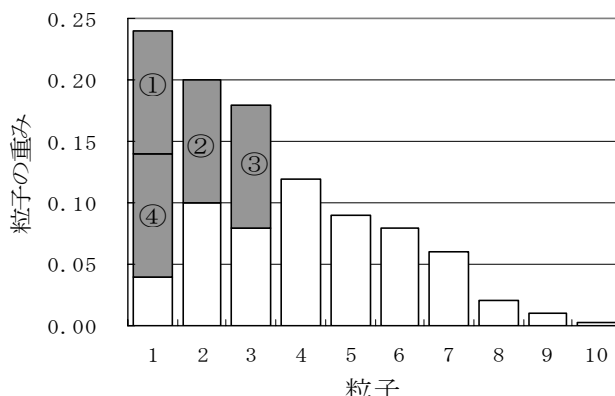


図 6.4.2 リサンプリングの概念図

(5)予測結果の比較

先に示した 2 つの手法の適用性を評価するために、実績レーダ雨量を予測雨量とみなして解析を行った。流量の予測結果を図 6.4.3 および図 6.4.4 に、苦田ダム下流の予測水位結果を図 6.4.5 および図 6.4.6 に示す。誤差は改良誤差上乘せ法と粒子フィルタではほとんど差がないことがわかる。実績のハイドログラフと予測結果の適合性について、ハイドロの適合性（NASH 値）について Nash 値を整理した結果を表 6.4.1 ならびに表 6.4.2 に示す。

Nash 値を用いてハイドログラフ全体の適合度を評価する。式は以下のとおりである。

$$Nash \text{ 値} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_c(i) - Q_o(i))^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o(i) - Q_{AV})^2} \quad (30)$$

ここに $Q_c(i)$ は計算流量(1 時間ピッチ)、 $Q_o(i)$ は実績流入量(1 時間ピッチ)、 Q_{OAV} は実績流入量の平均である。評価の対象はハイドログラフの立ち上がりから洪水の低減部を対象とする。

これによれば、平成 18 年 7 月洪水以降の洪水を対象にした評価として、両者の結果は 0.7 以上の数字を示しており、実用上問題ない。

一方で、表 6.4.3 および表 6.4.4 に水位誤差、表 6.4.5 および表 6.4.6 にピーク水位の誤差を示す。ここに、水位誤差およびピーク水位の誤差は以下のように表される。

$$\overline{H} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (H_c(i) - H_o(i))^2} \quad (31)$$

$$\Delta H = H_{CPeak} - H_{OPeak} \quad (32)$$

ここに $H_C(i)$ は計算水位(1 時間ピッチ) , $H_O(i)$ は実績水位(1 時間ピッチ) , H_{CPeak} は計算水位のピーク値, H_{OPeak} は実績水位のピーク値を表す.

これによれば, 30cm 以内の誤差となっている. この原因として, HQ 式の精度, 降雨誤差によるものと考えられる. 本章で採用しているフィードバック法により, 観測データに適合するように, タンク内の水分量の補正や予測降雨の補正をしているにも関わらず, この程度の誤差として納まっているものと判断すれば, 洪水予報, 水防警報の判断に問題は生じないものと考えられる.

誤差上乘せ法, 粒子フィルタ法のいずれも精度は良いと考えられ, 実用上の問題はないものと考えられる. 図 6.4.4 に水位予測結果を示しているが, 洪水の立ち上がり付近に着目すれば, 実用的には両者とも水防警報による水防団の出動, 避難勧告等の発令に適用できる精度であると考えられる. フィードバック手法として, 改良誤差上乘せ法と粒子フィルタ法について比較した結果, 両者とも実用上問題ないことを確認した. 粒子フィルタ法は自由度の高い手法で, フィードバック手法として過去の履歴を考慮でできる手法であり, フィルタの設計方法, 観測値の誤差分布の設定方法等に研究の余地がある. また, 粒子フィルタ法はサーバ等の機器への負荷が大きい手法であり, サーバ等への負荷の軽減も今後の課題である.

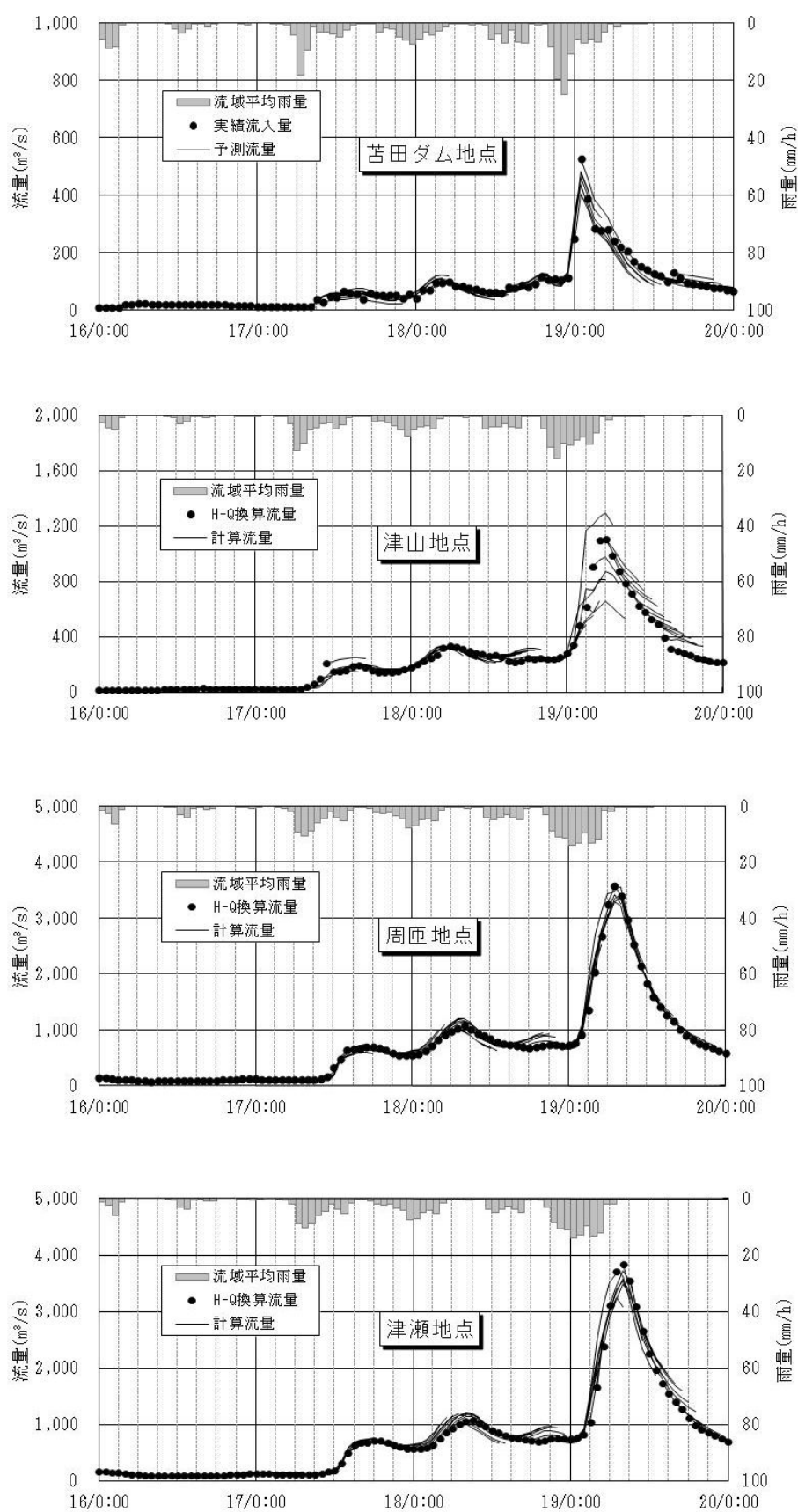


図 6.4.3 改良誤差上乘せ法による実測補正後の予測流量の比較

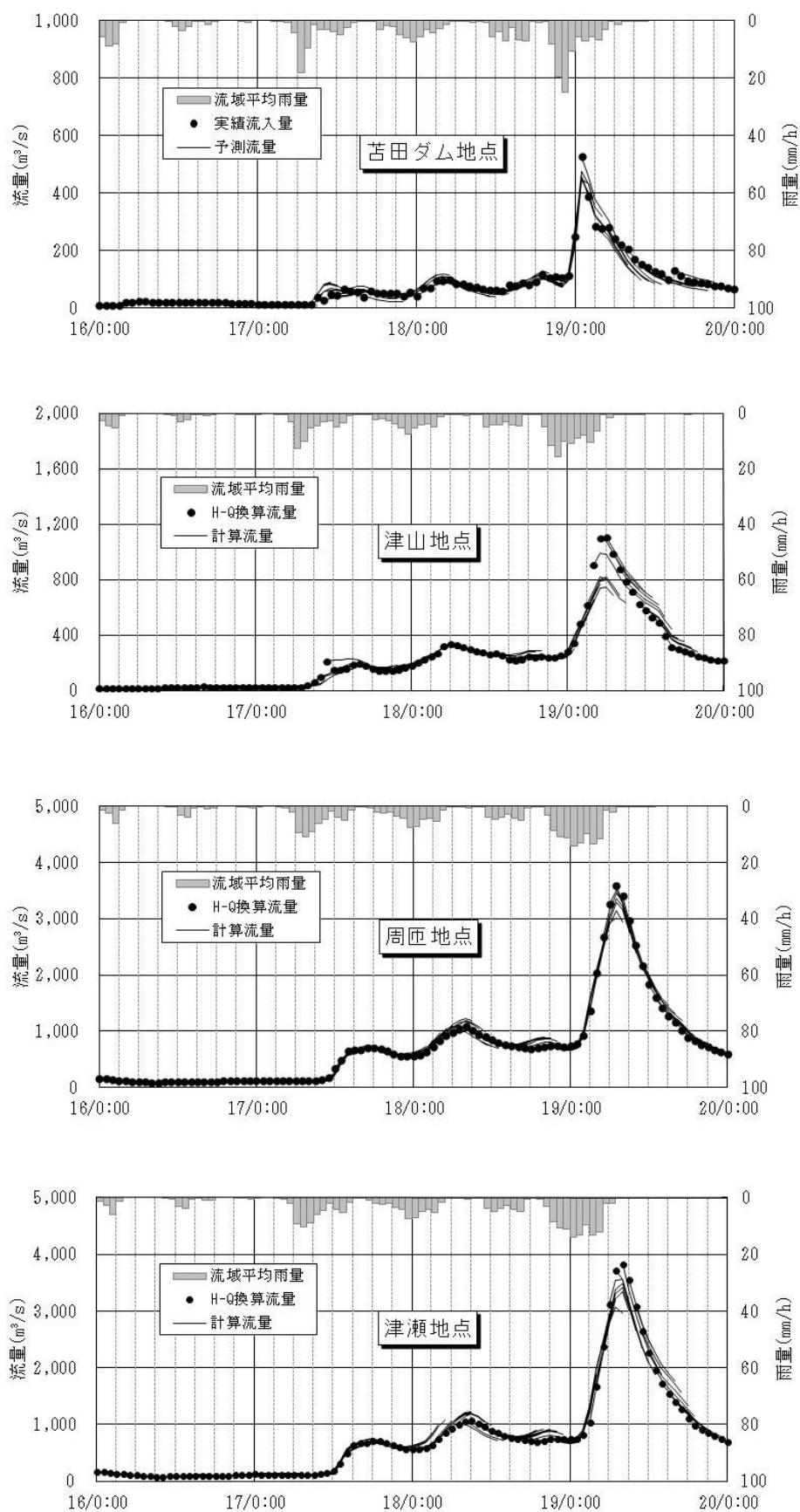


図 6.4.4 粒子フィルタ法による実測補正後の予測流量の比較

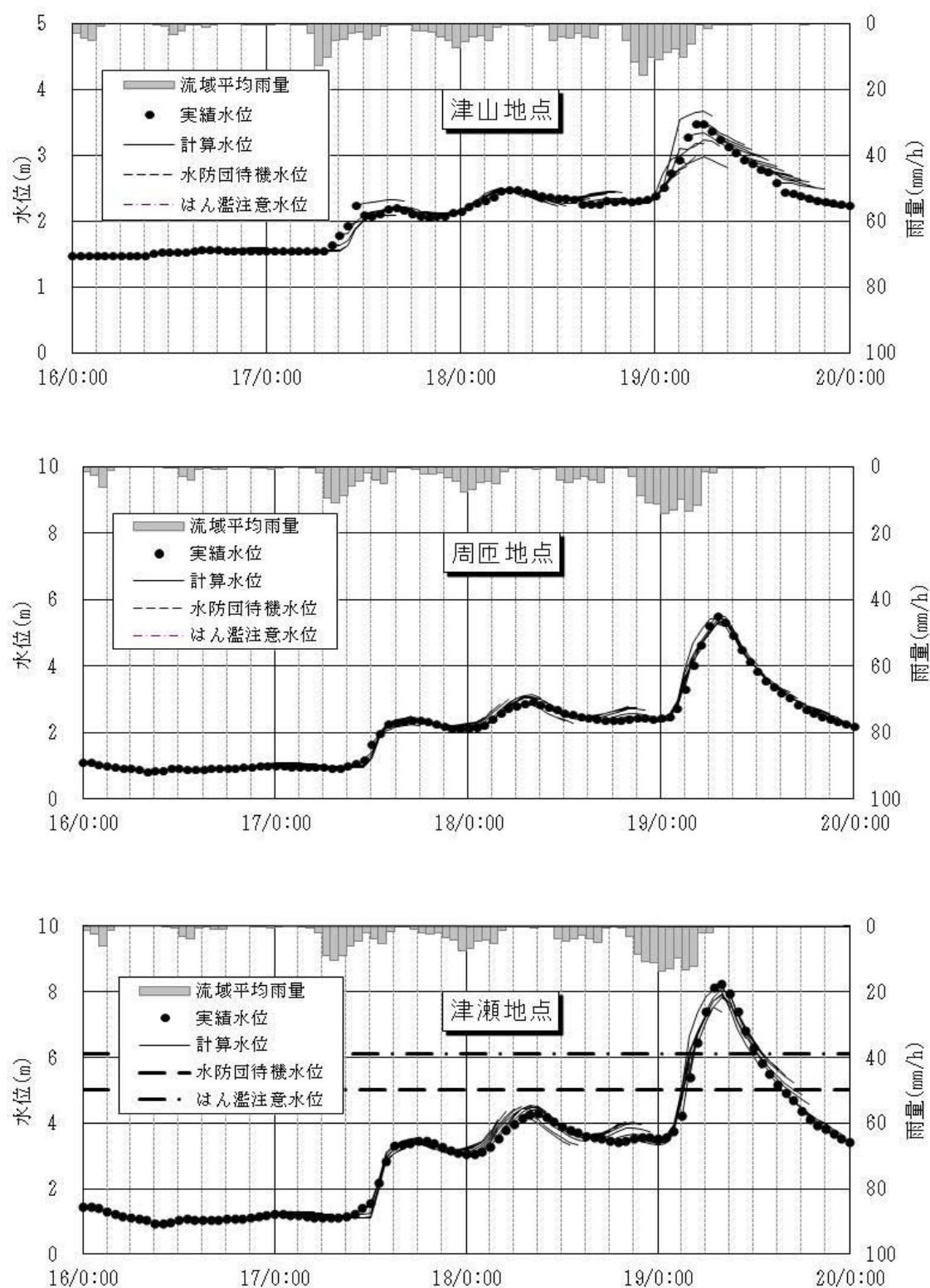


図 6.4.5 改良誤差上乘せ法による実測補正後の予測水位の比較

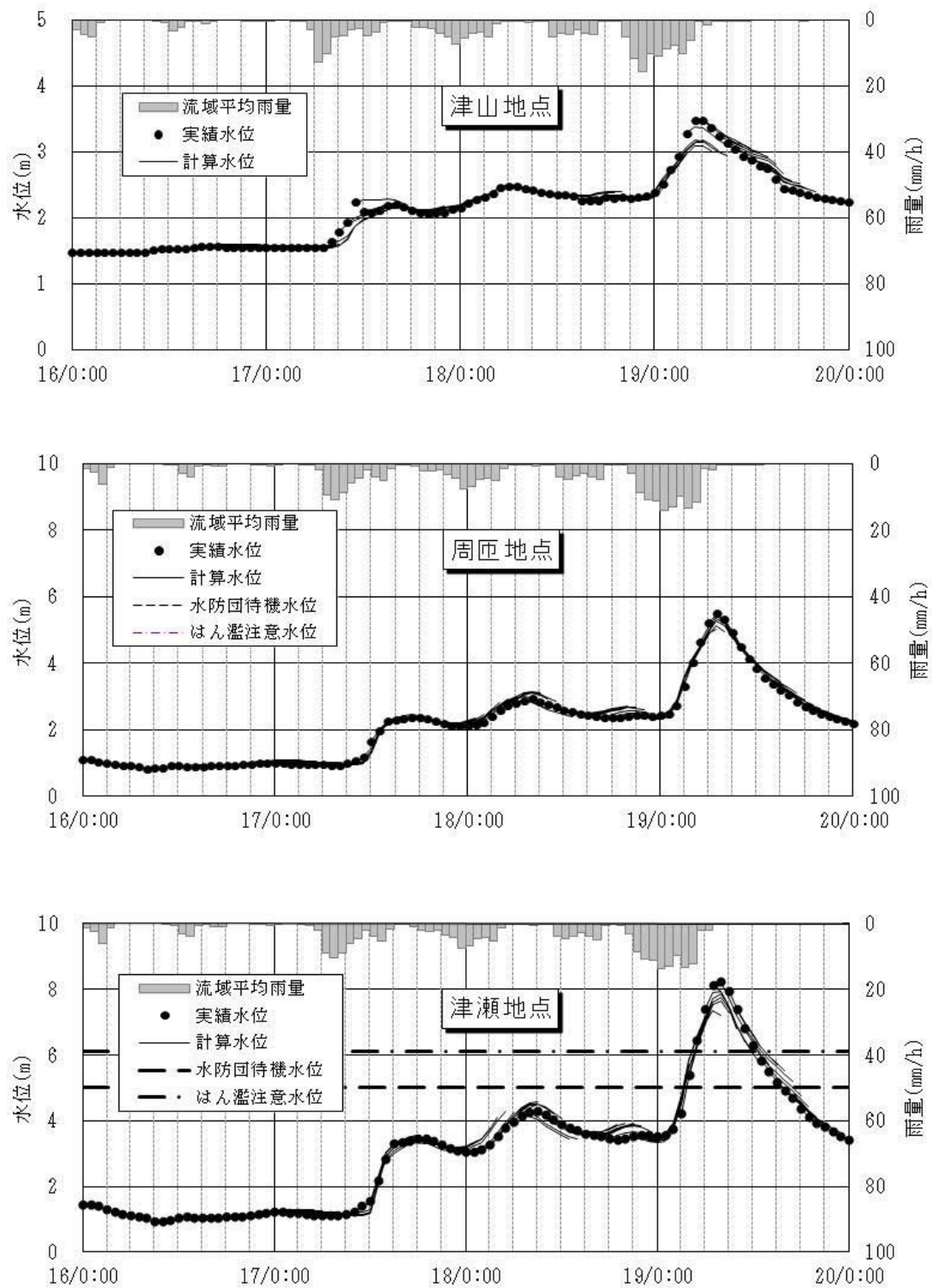


図 6.4.6 粒子フィルタ法による実測補正後の予測水位の比較

表 6.4.1 改良誤差上乘せ法の Nash 値（ハイドログラフ全体，3 時間後）

流量による評価

洪水名	評 価 地 点								
	苫田ダム	羽出西谷	杉	原	津山	高野	湯郷	周匝	津瀬
平成18年7月洪水	0.9445	0.8488	0.9615	0.9148	0.9108	0.9055	0.9359	0.9863	0.9724
平成19年7月洪水	0.8331	0.8191	0.8545	0.9695	0.9475	0.5596	0.9687	0.9531	0.9825
平成23年5月洪水	0.8981	0.8067	0.9406	0.9799	0.9544	0.8699	0.9785	0.9889	0.9733
平成23年7月洪水	0.7392	0.6445	0.9232	0.8376	0.9102	0.7044	0.9817	0.9536	0.9004
平成23年9月洪水	0.9002	0.9172	0.9727	0.9770	0.9643	0.9001	0.9682	0.9958	0.9732

水位による評価

洪水名	評 価 地 点								
	苫田ダム	羽出西谷	杉	原	津山	高野	湯郷	周匝	津瀬
平成18年7月洪水	-	0.8595	0.9569	0.9438	0.9222	0.9201	0.9578	0.9843	0.9781
平成19年7月洪水	-	0.7809	0.8481	0.9749	0.9510	0.6218	0.9712	0.9586	0.9743
平成23年5月洪水	-	0.7851	0.9294	0.9822	0.9593	0.8621	0.9810	0.9865	0.9819
平成23年7月洪水	-	0.6575	0.9400	0.9109	0.9398	0.7690	0.9838	0.9624	0.9048
平成23年9月洪水	-	0.9180	0.9660	0.9801	0.9717	0.9146	0.9736	0.9936	0.9842

Nash値0.7以上
 Nash値0.0～0.7
 Nash値0.0未満

表 6.4.2 粒子フィルタ法の Nash 値（ハイドログラフ全体，3 時間後）

流量による評価

洪水名	評 価 地 点								
	苫田ダム	羽出西谷	杉	原	津山	高野	湯郷	周匝	津瀬
平成18年7月洪水	0.9389	0.8337	0.9146	0.9148	0.9108	0.9055	0.9359	0.9863	0.9724
平成19年7月洪水	0.6590	0.6343	0.7376	0.9695	0.9475	0.5596	0.9687	0.9531	0.9825
平成23年5月洪水	0.8218	0.6984	0.8763	0.9799	0.9544	0.8699	0.9785	0.9889	0.9733
平成23年7月洪水	0.5555	0.6898	0.9377	0.8376	0.9102	0.7044	0.9817	0.9536	0.9004
平成23年9月洪水	0.9553	0.9135	0.9616	0.9770	0.9643	0.9001	0.9682	0.9958	0.9732

水位による評価

洪水名	評 価 地 点								
	苫田ダム	羽出西谷	杉	原	津山	高野	湯郷	周匝	津瀬
平成18年7月洪水	-	0.8648	0.9232	0.9438	0.9222	0.9201	0.9578	0.9843	0.9781
平成19年7月洪水	-	0.5126	0.7183	0.9749	0.9510	0.6218	0.9712	0.9586	0.9743
平成23年5月洪水	-	0.6624	0.8685	0.9822	0.9593	0.8621	0.9810	0.9865	0.9819
平成23年7月洪水	-	0.7279	0.9407	0.9109	0.9398	0.7690	0.9838	0.9624	0.9048
平成23年9月洪水	-	0.9324	0.9420	0.9801	0.9717	0.9146	0.9736	0.9936	0.9842

Nash値0.7以上
 Nash値0.0～0.7
 Nash値0.0未満

表 6.4.3 改良誤差上乘せ法の水位誤差（ハイドログラフ全体，3 時間後）

洪水名	評 価 地 点							
	羽出西谷	杉	原	津山	高野	湯郷	周匝	津瀬
平成18年7月洪水	0.10	0.08	0.08	0.10	0.08	0.14	0.11	0.21
平成19年7月洪水	0.05	0.09	0.02	0.04	0.08	0.06	0.10	0.13
平成23年5月洪水	0.06	0.07	0.03	0.06	0.10	0.09	0.10	0.19
平成23年7月洪水	0.11	0.07	0.09	0.06	0.07	0.05	0.11	0.27
平成23年9月洪水	0.10	0.11	0.06	0.08	0.12	0.12	0.09	0.23

表 6.4.4 粒子フィルタ法の水位誤差（ハイドログラフ全体，3 時間後）

洪水名	評 価 地 点							
	羽出西谷	杉	原	津山	高野	湯郷	周匝	津瀬
平成18年7月洪水	0.10	0.11	0.08	0.10	0.08	0.14	0.11	0.21
平成19年7月洪水	0.08	0.12	0.02	0.04	0.08	0.06	0.10	0.13
平成23年5月洪水	0.08	0.09	0.03	0.06	0.10	0.09	0.10	0.19
平成23年7月洪水	0.10	0.07	0.09	0.06	0.07	0.05	0.11	0.27
平成23年9月洪水	0.09	0.14	0.06	0.08	0.12	0.12	0.09	0.23

表 6.4.5 改良誤差上乘せ法のピーク水位誤差（ハイドログラフ全体，3 時間後）

洪水名	水位 (m)							
	評 価 地 点							
	羽出西谷	杉	原	津山	高野	湯郷	周匝	津瀬
平成18年7月洪水	-0.13	-0.08	-0.12	-0.20	0.04	-0.44	-0.20	-0.39
平成19年7月洪水	-0.01	-0.07	-0.03	0.04	-0.03	-0.10	0.20	-0.03
平成23年5月洪水	0.03	-0.03	0.13	-0.08	-0.10	-0.08	-0.10	0.16
平成23年7月洪水	-0.12	-0.12	0.21	-0.11	-0.11	0.06	-0.03	0.18
平成23年9月洪水	0.10	-0.19	-0.01	-0.05	-0.15	-0.02	-0.05	-0.19

表 6.4.6 粒子フィルタ法のピーク水位誤差（ハイドログラフ全体，3 時間後）

洪水名	水位 (m)							
	評 価 地 点							
	羽出西谷	杉	原	津山	高野	湯郷	周匝	津瀬
平成18年7月洪水	-0.14	-0.08	-0.12	-0.20	0.04	-0.44	-0.20	-0.39
平成19年7月洪水	-0.07	-0.07	-0.03	0.04	-0.03	-0.10	0.20	-0.03
平成23年5月洪水	-0.02	-0.06	0.13	-0.08	-0.10	-0.08	-0.10	0.16
平成23年7月洪水	-0.07	-0.04	0.21	-0.11	-0.11	0.06	-0.03	0.18
平成23年9月洪水	0.08	-0.25	-0.01	-0.05	-0.15	-0.02	-0.05	-0.19

6.5 ダム操作に配慮した洪水予測システムの構築

6.5.1 洪水予測モデル

洪水予測システムは，雨量・水位データから今後の河川の流量や水位の状況を情報提供するものである．したがって，過去の実績洪水による検証を行い，精度を担保した洪水流出モデルをシステムに組み込むことになる．

開発したステムには，出先機関で整備されている洪水流出モデルを参考に構築した集中型モデルと分布型モデルを組み込んだ．

6.5.2 ダムの洪水調節操作モデル

洪水予測システムでは，河川流量，水位の予測結果が表示される．特に，河川に洪水調節ダムが存在する場合，その操作によってダム下流の予測値が変化することが考えられる．一般に，洪水予測システムは一定間隔で自動演算するシステムであるため，操作規則をモデル化したダム洪水調節計算を実施している．

一方で，下流の洪水時の水位の状況から，ダムの洪水調節に対する住民等からの要望に対して，ダムで臨機に操作することが要求されるケースが増えてきている．そこで，このような要望に対して，あらかじめ洪水予測に対するダム操作をシミュレートしておくことは，今後のダム管理を考える上で，支援システムの構築は有効に働くものと考えられる．

本検討では，1 ダムについて，前述の考えの下で洪水調節モデルを作成した．表 6.5.1 および図 6.5.1，図 6.5.2 に示す，ダムの放流量を予測するための操作方式をシステムに組み込んだ．

表 6.5.1 ダム操作方式の一覧

操作 分類	操作内容	概要
基本 操作	①一定量放流 (現状放流量維持)	予測 12 時間に対して放流量を一定とする。
	②一定量放流 (任意放流量入力)	指定した放流量を一定で 12 時間先まで継続する。 ユーザは、放流量を入力。
	③一定率一定量 カット	流入量に対して目標放流量までは、一定率でカットし、 ピーク到達後は一定放流量とする放流。 ユーザはカット率とカット開始量を入力。
	④一定開度	計算から算出された現時点の開度を 12 時間一定として 放流。
	⑤放流量手動設 定	ユーザが指定した放流量に応じた計算を実行する機能。 放流量はユーザが設定した値で計算する。
	⑥最適操作	下流のネック地点に対し、ユーザが指定した貯水位を最 大限使用した場合の最適操作を求め、放流量を計算する。
追 加 操 作	①但し書き操作	貯水位がただし書き操作に移行する場合は、上記放流ル ールから、ただし書き操作に変更となる。
	②後期放流操作	水位低下操作のための後期放流を実施するか指定する。 指定しない場合は、流入量が放流量を下回った場合には、 流入量＝放流量として計算する。

表 6.5.1 における⑥最適操作とは、ダム下流の水位が氾濫危険水位を超えないように、洪水到達時間、ダム下流の流域からの流出量を考慮したダムの操作である。このシステムにおいては、リアルタイムで放流量を計算し、ダムを操作している職員に情報提供する機能を持っている。

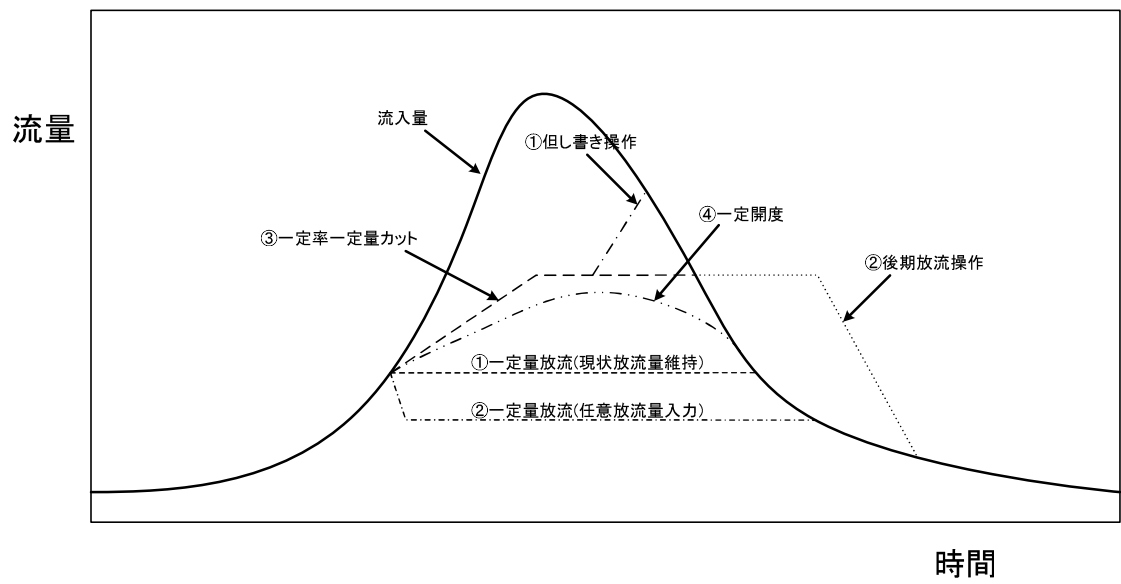


図 6.5.1 ダム操作イメージ

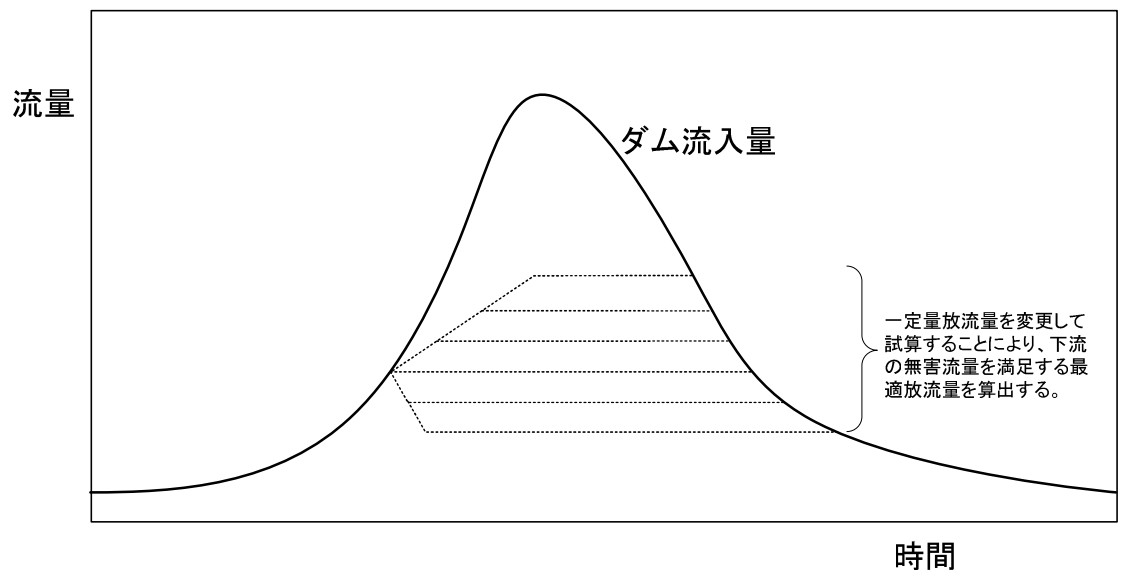


図 6.5.2 最適操作のイメージ

6.6 ダム放流操作支援システムの開発

6.6.1 システム構成

システムは、下記の 4 つの機能を持ったサブシステムとデータ・ベースで構築した。システムの構成を図 6.6.1 に示す。

- ①予測計算機能
- ②シミュレータ機能
- ③外部通信機能
- ④管理機能
- ⑤データ・ベース

このシステムの設計の基本的な考え方として、以下の点に留意した。

- ・データ・インタフェースの標準化することで、将来的に他水系へ拡張できること
- ・データ・ベースを中心とした自動計算による洪水予測システムとダム操作の変更に伴う下流河川の水位予測をシミュレートできること
- ・統一河川情報システムからデータ取得できること

6.6.2 外部システムとのデータ連携

今回構築したシステムは、将来的にわたって必要と想定されるデータに関して、統一河川情報システムから、全て取得するものとした。

対象とするデータの種類の、表 6.6.1 に示す通りである。

表 6.6.1 外部システムから取得するデータ一覧

データ内容	データ提供システム	データ更新	予測時間	予測結果出力間隔
実績テレメータ (地点雨量・水位)	統一河川 TM 伝送系	10 分間隔	—	—
流域平均雨量	洪水予測システム データ取得は統一 TM 系経由	1 時間間隔	6 時間先	1 時間間隔
ダム・堰諸量	統一河川 TM 伝送系	10 分間隔	6 時間先	1 時間間隔
全国合成レーダ (国交省：現況)	統一河川 RD 伝送系	5 分間隔	—	—
移動解析レーダ (国交省：予測)	統一河川 RD 伝送系	10 分間隔	3 時間先	10 分間隔
統合プロダクト (気象庁：現況)	統一河川 RD 伝送系	10 分間隔	—	—
ナウキャスト (気象庁：現況)	統一河川 RD 伝送系	10 分間隔	1 時間先	10 分間隔
降水短時間予報 (気象庁：現況)	統一河川 RD 伝送系	30 分間隔	6 時間	10 分間隔

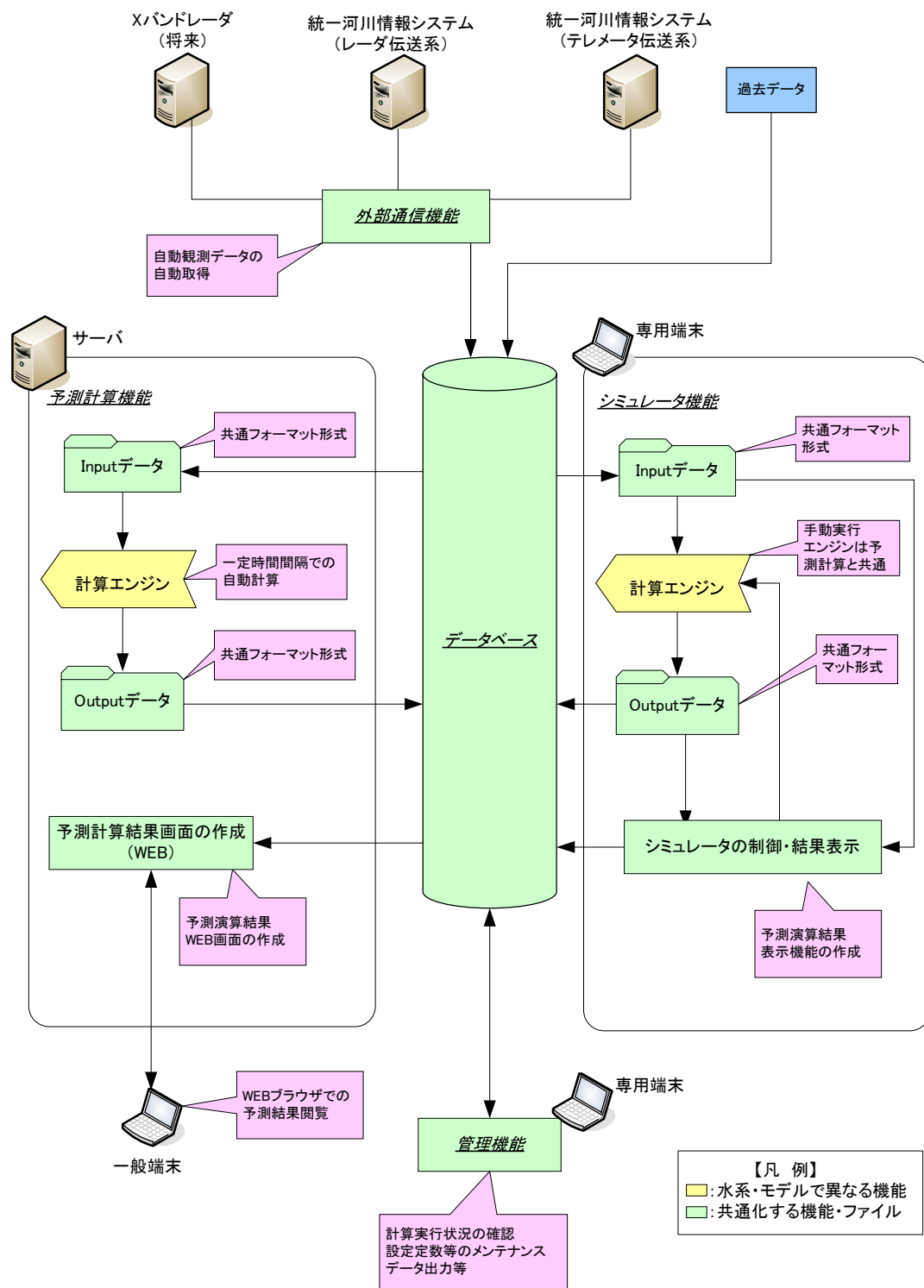


図 6.6.1 全体システムの構成

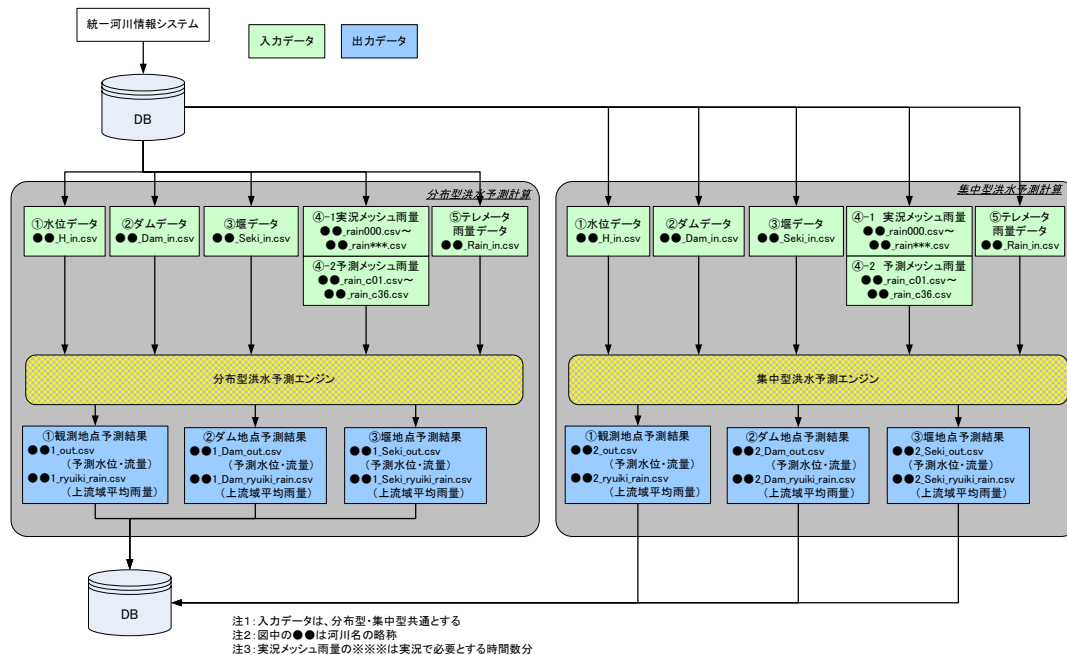


図 6.6.2 予測モデルと入出力ファイルの関連図

6.6.3 予測計算機能および計算実行部

(1) 予測計算機能

本機能は、洪水予測計算の実行に必要なデータ・ファイルをデータ・ベースから作成する機能、さらに計算結果をデータ・ベースに登楼する機能である。

さらに、予測計算間隔は、テレメータの配信時間等を踏まえて 10 分間に 1 回とした。予測期間は、予測雨量として最長の配信データが降水短時間予報（6 時間先）である。しかし、ダム操作シミュレーション機能を考えた場合、演算時間が 6 時間とした場合は短いため、予測演算時間としては 12 時間先までとした。その際に、自動計算時の 6 時間後以降の 12 時間先までの予測雨量に関しては、6 時間後の最終値を利用して計算を実行するものとした。ただし、6 時間以降の計算に関しては、降雨の予測精度が低下するため、ダム操作シミュレーション以外の計算結果の表示に関しては、6 時間先までとした。

(2) 入出力データの定義

本業務で構築したデータ・インタフェースは、対象河川以外にも拡張できるように考慮した設計を行った。水系毎に入出力ファイルが異なる場合、水系を追加する毎にシステム改修が大きくなるため、入出力ファイルの作成ルールは全水系で統一することとした。これを踏まえたシステム構築の前提条件を設定した。

- ・ファイル形式：CSV 形式
- ・入力ファイル：集中型、分布型で共通
- ・欠測データの処理：エンジン側

- ・入出力ファイル：各河川の略称を追記管理（ここでは，吉井川）

(3) ユーザインタフェース

吉井川および苦田ダムにおける洪水予測値は，表 6.6.2 に示す機能を有する画面で表される．

表 6.6.2 予測計算結果 WEB 表示機能一覧

No	画面名称	機能概要
①	予測結果流域図	WEBシステムの初期画面 全予測地点における水位状況（実況・予測）を俯瞰的に把握できる機能
②	予測結果一覧	全予測地点におけるハイドログラフ（実況・予測）をサムネイル形式で一覧表示する機能
③	河道予測グラフ	各予測地点におけるハイト・ハイドログラフ（実況・予測）を詳細グラフと簡易表で表示する機能
④	河道予測表	各予測地点におけるハイト・ハイドロ表を現時刻の前後 6 時間について表形式で表示する機能
⑤	ダム予測グラフ	各ダム予測地点におけるハイト・ハイドログラフ（実況・予測）を詳細グラフと簡易表で表示する機能
⑥	ダム予測表	各ダム予測地点におけるハイト・ハイドロ表を現時刻の前後 6 時間について表形式で表示する機能
⑦	メッシュ雨量図	流域における予測メッシュ雨量を切替て表示する機能（移動解析・降水ナウキャスト・降水短時間予報）
⑧	ステータス	現状の洪水予測計算に入力した降雨データ種別について表示する機能

本システムで予測結果を表示する地点を以下に示す．

- ・ダム地点：苦田ダム
- ・河道予測地点：高野，津瀬，御休，津山，周匝，湯郷，尺所，河田原，九幡（流量のみ），羽出西谷，杉，原

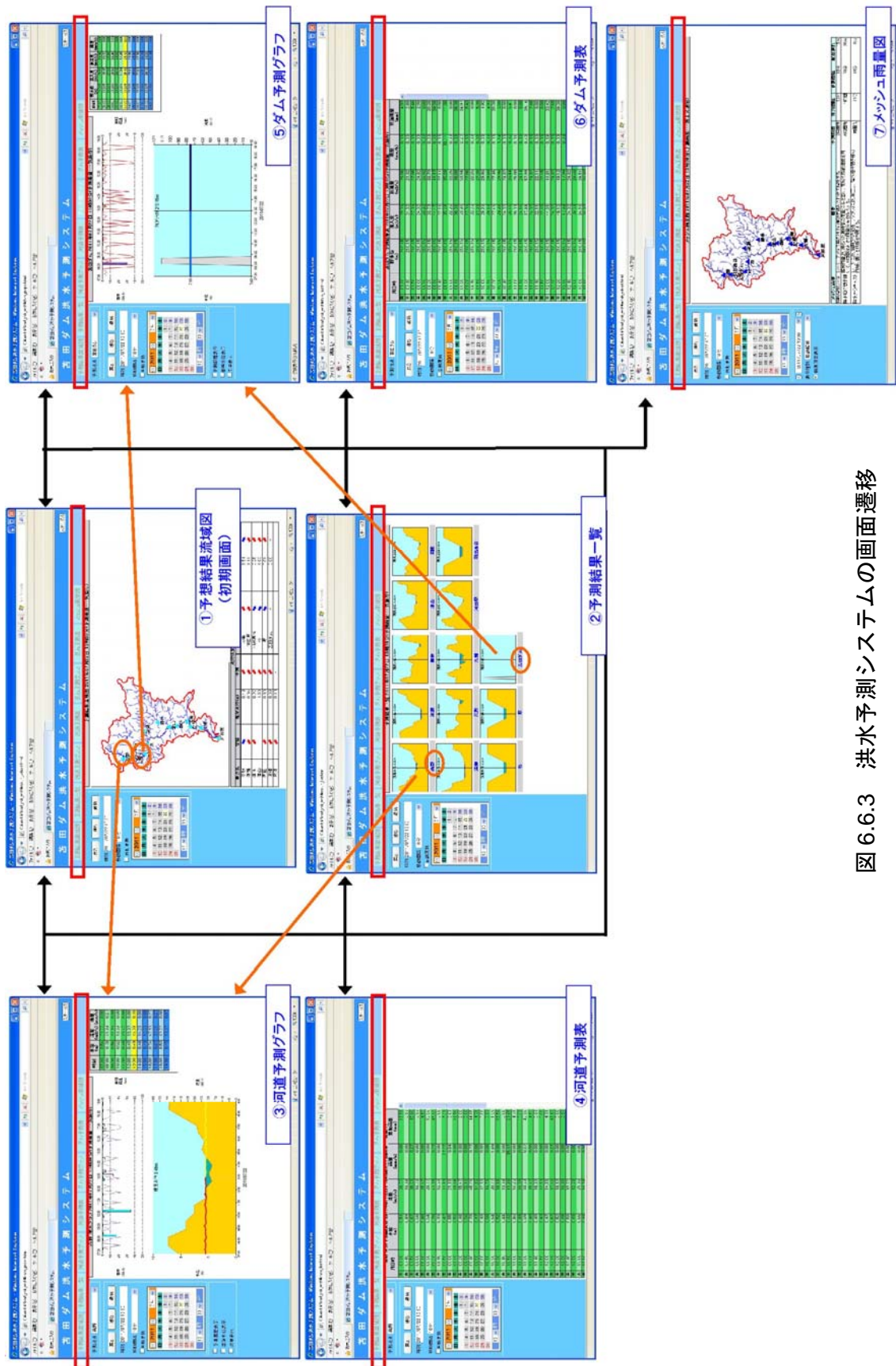


図 6.6.3 洪水予測システムの画面遷移

6.6.4 ダム操作支援のためのシミュレータ機能

シミュレータ機能は、データ・ベースから自動予測結果データや任意のダム操作に必要な条件データ（手動）を用いて、ダム放流シミュレーションや既往洪水検証等を実施するものである。なお、これらの機能は、オフラインで実行する機能である。

以下に、主な機能を示す。これらの画面遷移を図 6.6.4 に示す。

(1)ダム放流演算

1)洪水予測システムの計算結果に対する再計算

リアルタイムの計算結果（操作規則どおり）に対して、放流量を変更した場合の予測計算を実行し、ダム、下流地点の状況を表示する機能

2)洪水調節効果の出力

自動計算結果に対して、ダム調節効果（下流観測所地点での評価）を再計算により表示する機能

3)既往洪水検証

既往洪水を対象として、定数を変更して精度検証を実施する機能

(2)降雨条件変更計算

1)降雨データ変更再計算

予測計算に使用する降雨条件を選択して、比較計算を実行する機能

2)仮想降雨によるシミュレーション

仮想降雨を設定してシミュレーションする機能

また、シミュレータの計算実行部分については、5 種類の計算が必要になりことから、シミュレータに対応したエンジンを複数用意する必要が生じる。その場合、メンテナンス時にそれぞれのエンジンを更新しなければならず、更新漏れなどヒューマンエラーが生じる可能性がある。そこで、シミュレータ機能のエンジンは共通とし、これを制御するための計算条件定義ファイル（図 6.6.5 中の【計算フラグ ○○_calflg.csv】）をシステムが作成することとした。

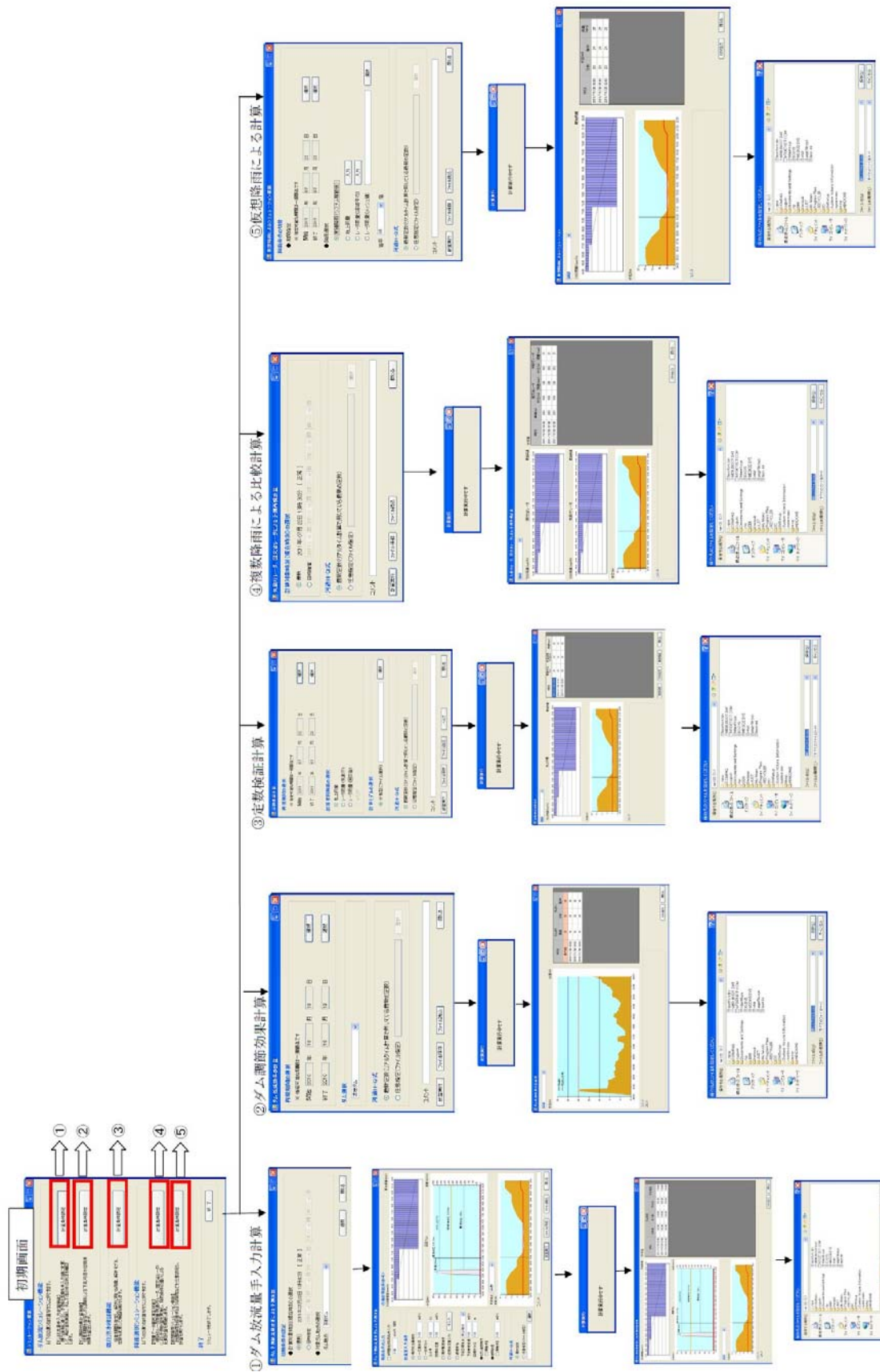


図 6.6.4 ダム操作支援システムの画面遷移

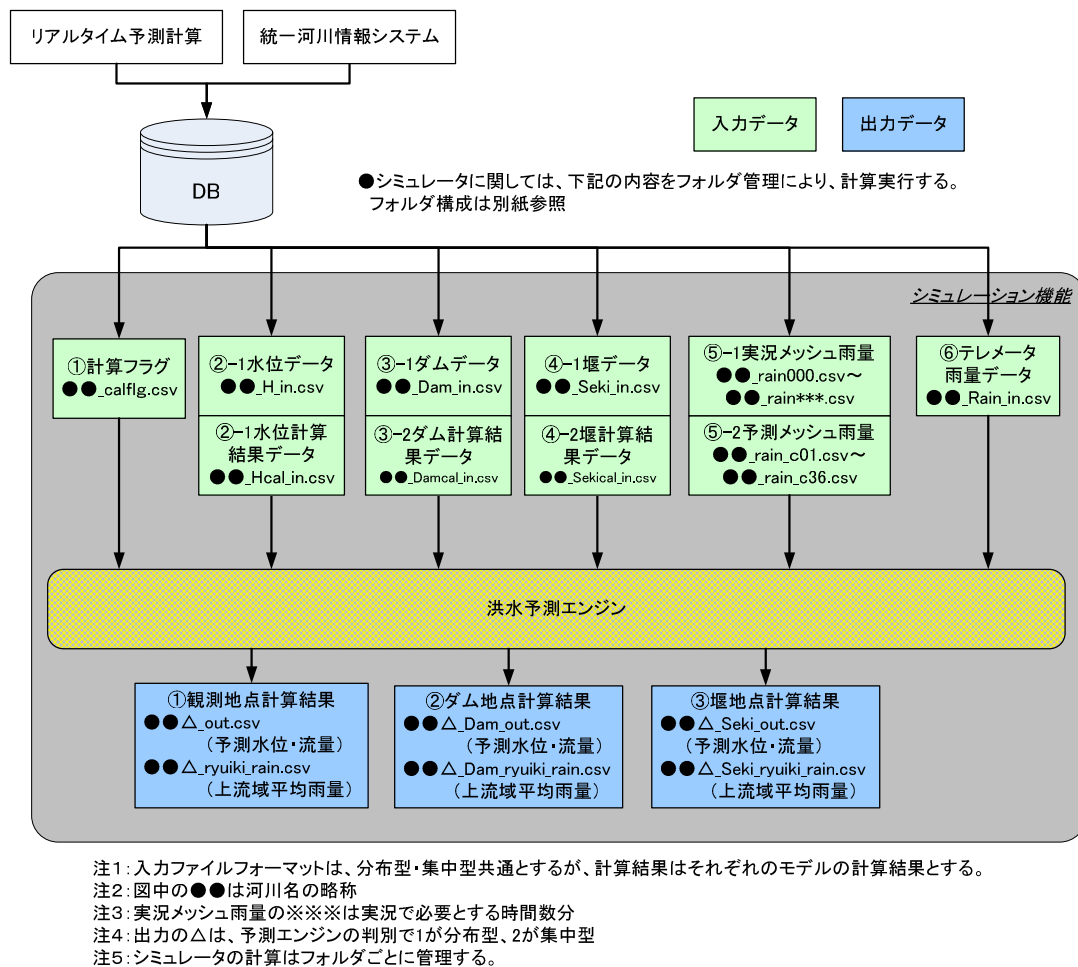


図 6.6.5 予測計算をする場合の計算エンジンと入出力ファイルの関連

6.6.5 データ・ベース

(1)データ格納方法

シミュレータでは、5つのサブシステムで機能分担し、それぞれが独立稼動すること
で、マルチタスク的な処理を行うことが可能である。ただし、マルチタスク処理を行う
には、データの書き出しや保存等のプロセスを多重アクセスとして管理する必要がある。

これにより、洪水予測システムでは、多重アクセスに対する安定性やデータ読込みに
対する効率性を考慮し、データベースソフトを利用した「データ・ベース形式」を採用
した。

(2)データ・ベースの選定

システムが取り扱うデータは、以下の特徴がある。

- ・観測所の定義データ等の静的データ（時系列で定期的に変化しないデータ）
- ・テレメータデータやレーダデータ、自動計算結果等のような動的なデータ（時系列
で変化するデータ）

OS との相性や操作性を考慮し、「Microsoft SQLserver」を採用した。また、動的データに関しては、大容量のデータ処理が早い「cassandra」¹⁶⁾を採用した。

6.7 おわりに

本章では、吉井川の洪水予測システムの構築に向けた、洪水予測の精度向上方策、洪水予測システムと連動したダムの開発の考え方について論じた。

本章での結論を、以下のように要約する。

- ・分布型洪水予測モデルを構築する際に、最適定数の同定方法として、**SCE-UA** 法を適用した。その結果、検討対象洪水での同定結果は良好であった。
- ・洪水予測システムの精度を向上させる方法として、一般的にフィードバック手法が用いられる。本章では、この方法として観測データとの乖離を埋める方法として、（改良）誤差上乘せ法と粒子フィルタ法の適用性について検討した。その結果、いずれの方法も実用上の精度は担保されていることがわかった。
- ・システムの一部をプラットフォーム化することによる、予測モデルの種類に依存しないシステムの設計を構築した。
- ・操作規則で定義されている操作以外にも、下流の河道の状況に応じて臨機応変な操作（例えば、規則上の放流量よりも少なく放流する）が要求される事例がある。苫田ダムは例外でなく、今後の洪水の規模や降雨の分布に応じて対応が迫られることも想定したシステムを構築した。本章では、このような例外的な操作にも対応できるように、ダム操作支援機能として、下流の状態を見て放流量を自動的に算出する機能や、流域の予測計算とその結果を容易に比較できるように演算機能とその画面を開発した。これにより、非常時のダム操作による下流への影響を把握でき、操作の意志決定支援に役立つものとなった。
- ・開発したシステムは、日常はあまり稼働しないことから、職員の教育・訓練に使えるようにも配慮し、自由に演算ができるようにした。この機能は、シミュレータ機能で実現された。また、洪水予測結果の確認や、実測値に対する計算値の精度も閲覧することができる機能を有している。

参考文献

- 1) 清水裕, 福永健, 太田垣 暁, 蠣崎 哲, 佐々木 晋: 統一河川情報システム (表現と活用シナリオ), 平成16年度 河川情報シンポジウム 講演集, pp.1-9, 2004.
- 2) 国土交通省中国地方整備局八田原ダム管理所:
<http://www.cgr.mlit.go.jp/fukuyama/kisya/kisya_100714.pdf>, 平成22年7月
- 3) (独)水資源機構: 青蓮寺ダム, 比奈知ダム, 室生ダム 名張川上流3ダム連携による台風18号時の統合操作, 2009.
- 4) 日野幹雄: 水文流出系予測へのカルマン・フィルター理論の適用, 土木学会論文集, No.221, pp.39-47, 1974.1
- 5) 佐山敬洋, 立川康人, 寶馨: バイアス補正カルマンフィルタによる広域分布型流出予測システムのデータ同化, 土木学会論文集, 土木学会論文集B, 64(4), pp.226-239, 2008.
- 6) 高棹琢馬・池淵周一・小尻利治: 水量制御からみたダム群のシステム設計に関するDP論的研究, 土木学会論文報告集, No.241, pp.39-50, 1975.1
- 7) 佐山 敬洋・立川 康人・菅野 浩樹・寶 馨: 分布型流出モデルと動的計画法の統合による貯水池制御最適化シミュレータの開発, 水工学論文集 Vol.54, pp. 547 - 552, 2010.3.
- 8) 立川康人, 佐山敬洋, 寶馨, 松浦秀起, 山崎友也, 山路昭彦, 道広有理: 広域分布型物理水文モデルを用いた実時間流出予測システムの開発と淀川流域への適用, 自然災害科学 26-2, pp.189-201, 2007.
- 9) 国土交通省水管理・国土保全局: 吉井川水系河川整備基本方針, 2009.3
<http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/seibi/pdf/yoshiigawa75-1.pdf>
- 10) 猪股広典, 深見和彦: 吉野川流域広域洪水危険度判断支援システムの開発, 河川技術論文集, Vol.13, pp.433-438, 2007.
- 11) 田齋秀章, 平松和昭, 森牧人, 原田昌佳: SCE-UA法を用いたTOPMODELパラメータの特性評価, 九州大学大学院農学研究院学芸雑誌, 61(2), pp.261-272, 2006.
- 12) (財)北海道河川防災研究センター・研究所: 「実時間洪水予測システム理論」解説書, 2004
- 13) 工藤亮治, 近森秀高, 永井明博: 粒子フィルタを用いた河川流域における実時間洪水予測, 農業農村工学会論文集, No.259, pp.17-25, 2009.
- 14) 立川康人, 須藤純一, 椎葉充晴, 萬和明, キムスンミン: 粒子フィルタを用いた河川水位の実時間予測手法の開発, 水工学論文集, 第55巻, pp.S511-S516, 2011.
- 15) 北川源四郎: モンテカルロ・フィルタおよび平滑化について, 統計数理, 第44巻1号, pp.31-48, 1996.
- 16) The Apache Software Foundation : < <http://cassandra.apache.org/> >

第 7 章 洪水予測システムにおける Particle Filter の適用性と予測雨量の誤差分布の特性を考慮した確率水位予測に関する研究

7.1 はじめに

2011 年の台風 12,15 号において、河川の氾濫や土砂災害で 84 名が死亡・行方不明¹⁾になった。気象庁と学識者による研究会では、防災情報を発表する側と受手側に各種のギャップが存在するのが現状で、情報の質についての認識を両者が共有する必要がある¹⁾と指摘している。

洪水予報は、河川水位が基準水位を超えると予測されるときに気象庁と河川管理者が共同で発表する仕組みとなっている。これを受ける地方自治体は、水位予測結果をもとに、防災担当者の召集、水防団の待機・出動、避難勧告、避難指示の判断と適宜発令を行う。しかし、河川管理者の立場から見ると、水位予測結果に対する分析が必要であり、これに時間を要して公表が遅れることも想定される。

このような状況を回避するための方策のひとつに、レーダ雨量を活用した実況雨量の精度向上、高解像度の降雨予測モデル、分布型流出モデルの導入などによる洪水予測システムの精度を向上させることが考えられる。一方で、予測においては、観測誤差などのノイズを除外できないために、期待するほどの予測精度が向上できない可能性は否定できない。そこで、洪水予測の入力条件である降雨予測の誤差を利用し、幅を持たせた予測を提供するシステムを構築することも必要であると考えられる。このような考えに立てば、水位予測結果と同時に、予測結果の信頼区間、基準水位を超過する確率など質に関する情報を合わせて提供することで、河川管理者における様々な判断に有効に活用できるものと考えられる。

水位予測結果の信頼区間、基準水位の超過確率を解析するためには、流出モデル、H-Q 式、実況及び予測雨量の誤差などを解析し、水位予測結果に反映する必要がある。

これらをシステムに反映する手法として、カルマンフィルタがあり、貯留関数法モデルと拡張カルマンフィルタ²⁾を組み合わせた手法³⁾は従来から研究されてきた。

近年、モンテカルロ近似を利用した粒子フィルタ⁴⁾が注目されて、洪水予測においても適用例として、河道の不定流モデルにおける粗度係数を状態量とした事例⁵⁾、上流端および残流域の流入量を状態量とした事例⁶⁾が報告されている。これらの研究は、洪水予測の計算過程における初期段階である現時刻の観測値に対する状態量を推定する方法に関する研究が多い。これらの研究は、全て現時刻の観測値を説明しうるように時間的制約を設定せずに検討されている。実際の現場においては、時間的な制約がある中では、そのままの適用は難しいものと考えられる。従来の運用中のモデルでは、入力条件に降雨の誤差分布は与えず、雨量に誤差がないと仮定して、流出モデルのパラメータの調整(フィードバック)が行われてきたが、全て決定論的な洪水予測手法であり、観測値や入力値の不確実性については考慮されていないため、その予測結果についての信頼性が不明のままであった。この問題に対する研究はほとんど行われていない。

本章では、第6章と同様に、時間的制約が10分で予測結果を算出しなければならないという条件の下で、現時刻に対する状態量の推定と、予測雨量の誤差も考慮した確率的な水位予測方法を提案した。すなわち、これらの現時刻までのフィードバック手法に加えて、予測計算段階での予測雨量の不確実性を確率論的な情報として演算を行う洪水予測システムの拡張性について、具体的な流域を対象に検討したものである。検討内容としては、まず、入力データの誤差として、洪水時の予測雨量と実測雨量の誤差分布を、二次元指数分布で近似した。その上で、誤差分布を粒子フィルタと結合することで、分布型流出モデルによる河川水位の確率分布の予測の可能性について検討することを目的とした。

7.2 水位の確率分布を予測するモデルの概要

7.2.1 水位予測システムの概要

予測雨量を用いた水位予測システムのイメージは図7.2.1のとおりで、図の左側で粒子フィルタにより洪水予測モデルを同化する。その結果得られた最適な状態量の粒子と図の左側で得られた予測雨量を誤差分布と組み合わせて、水位予測を行うものである。

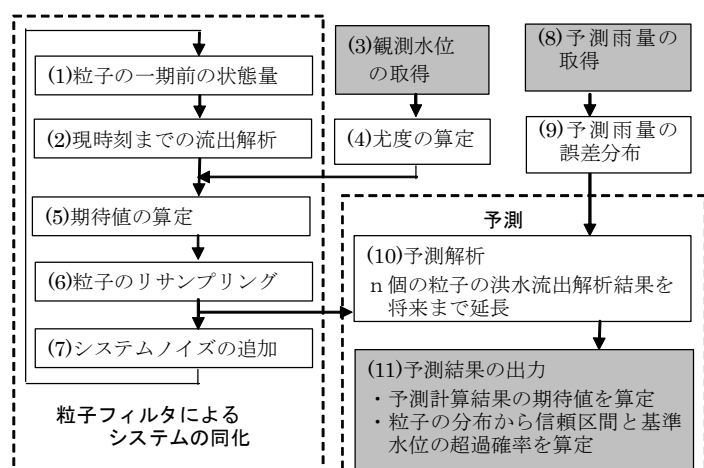


図 7.2.1 水位予測システム概要図

7.2.2 分布型流出モデル

図7.2.2に示す兵庫県武庫川流域(流域面積約500km²)で稼働中の水位予測システムは0.5kmメッシュ(国土数値情報の3次メッシュの1/2)で、表層モデルと地下水モデル

の 2 層構造であり、土木研究所が開発したモデル⁷⁾を使用した。武庫川流域では下流域が高度に市街化しており、上下流の流出特性の違いが大きく、国土数値情報の土地利用細分メッシュデータを使用し、流出特性の違いを反映させている。

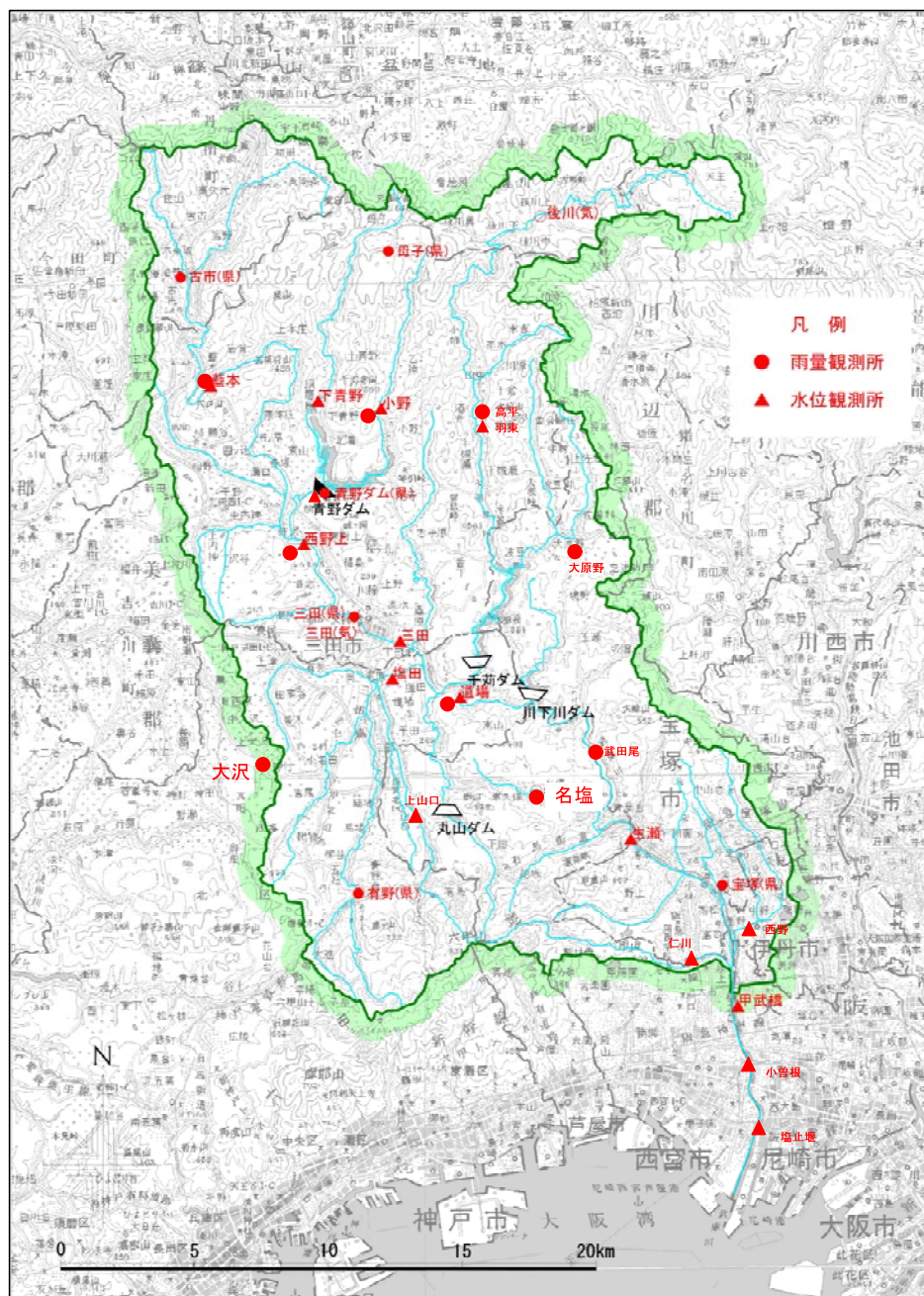


図 7.2.2 武庫川水系の概要図

7.2.3 粒子フィルタ

従来、洪水予測には拡張カルマンフィルタ²⁾が用いられてきたが、システムが複雑になると、共分散行列が安定しないこと、ヤコビ行列を解かなければならないことが問題であった⁸⁾。これを解決する方法のひとつがモンテカルロ近似を用いる手法で、アンサンブル・カルマンフィルタ(Ensemble Kalman Filter : EnKF)⁹⁾と粒子フィルタがある。EnKF は海洋・気象分野の膨大なデータの同化に利用されている。一方で、粒子フィルタは画像における移動体の追跡¹⁰⁾など不規則に変動する非線形性の強い時系列データに利用されている。

両者の違いは観測値によるデータ同化方法にあり、EnKF が Kalman Gain を元にした線形近似であり、粒子フィルタは Kalman Gain を使用しないで、重み関数によるサンプリングである。この違いから、粒子フィルタは非線形性の強い現象に対して優れている⁸⁾と考え、粒子フィルタを採用した。

7.2.4 予測雨量の誤差分布

実況雨量としてレーダアメダス解析雨量、予測雨量としては、1 時間先までに降水ナウキャスト、6 時間先までに降水短時間予報を利用した。また、収集した予測雨量をすべて使用して、流域平均で誤差分布を解析した。

本章の水位予測システムは、雨量をメッシュ単位で扱うものであるため、雨量誤差をメッシュ単位で扱うことが理想である。雨量誤差は雨域の空間スケール、リードタイム、雨量強度等の要因に依存すると考えられるので、これらの要因と誤差の関係を分析して、予測誤差の評価方法を改良していく必要がある。

これまでの予測雨量の誤差分布を取り扱った研究では、雨量の大きい方に裾が長い分布になることが知られている。東海林らの研究¹¹⁾では、ガンマ分布を適用し尺度母数、形状母数は雨量強度の関数として、分散を実績データにより経験的に設定している。しかし、ガンマ分布は形状母数が 1 に近く、確率変数が 0 に近い場合に確率密度が急激に 0 から無限大に変化するなど、定数を決定しにくくなる場合がある。このため、著者らは無降雨から洪水までの確率密度が急激に変化せず、かつ予測雨量誤差の確率分布が統計量(平均、相関係数)で表現できる手法として、二次元指数分布の適用を試みた。

7.3 雨量の予測誤差分布

7.3.1 分布関数

二次元指数分布については長尾ら¹²⁾が理論分布を示しており、以下のとおりである。3)の条件付き確率分布は予測雨量が 0 のときには $I_0(0)=1$ であるため、確率分布は指数分布になり、予測雨量が大きくなると $I_0(0)$ は単調増加し、確率分布は上に凸となる。

(1)二次元確率分布

$$f(R,r)=\frac{1}{\sigma_R\sigma_r(1-\rho)}\exp\left\{-\frac{R}{\sigma_R(1-\rho)}-\frac{r}{\sigma_r(1-\rho)}\right\}I_0\left(\frac{2\sqrt{\rho}}{1-\rho}\sqrt{\frac{Rr}{\sigma_R\sigma_r}}\right) \quad (1)$$

(2) 周辺分布

$$f_R(R) = \frac{1}{\sigma_R} \exp\left\{-\frac{R}{\sigma_R}\right\}, \quad f_r(r) = \frac{1}{\sigma_r} \exp\left\{-\frac{r}{\sigma_r}\right\} \quad (2)$$

(3) 予測雨量の条件付き確率分布

$$f(R|r) = \frac{1}{\sigma_R(1-\rho)} \exp\left\{-\frac{R}{\sigma_R(1-\rho)} - \frac{\rho r}{\sigma_r(1-\rho)}\right\} I_0\left(\frac{2\sqrt{\rho}}{1-\rho} \sqrt{\frac{Rr}{\sigma_R\sigma_r}}\right) \quad (3)$$

ここに R は実績雨量, r は予測雨量, σ_R は実績雨量の尺度母数, σ_r は予測雨量の尺度母数, ρ は定数で $0 \leq \rho < 1$ の範囲, $I_0(x)$ は第 1 種 0 次の変形ベッセル関数である.

7.3.2 3 時間先までの予測雨量と実績雨量の関係

3 時間先までの予測雨量と実績雨量の関係を見るために, 武庫川流域の基準点甲武橋上流域の流域平均雨量を対象とし, 実績雨量として気象庁レーダアメダス解析雨量を用いている. 期間は 2008 年 4 月から 2011 年 9 月の 37 ヶ月(2009 年 4 月と 2011 年 1 月～4 月はデータなし)とした. サンプルングは 1 時間ピッチで行い, データ数は 24,428 個となり, 図 7.3.1 に実績と予測雨量の分布図を示す. データの密度は実績, 予測雨量ともに 0mm/3hr の雨量データが全体の 76%で, とともに 3mm/3h 以下が 91%, 10mm/3hr 以下が 97%, 18mm/3hr 以下が 99%である.

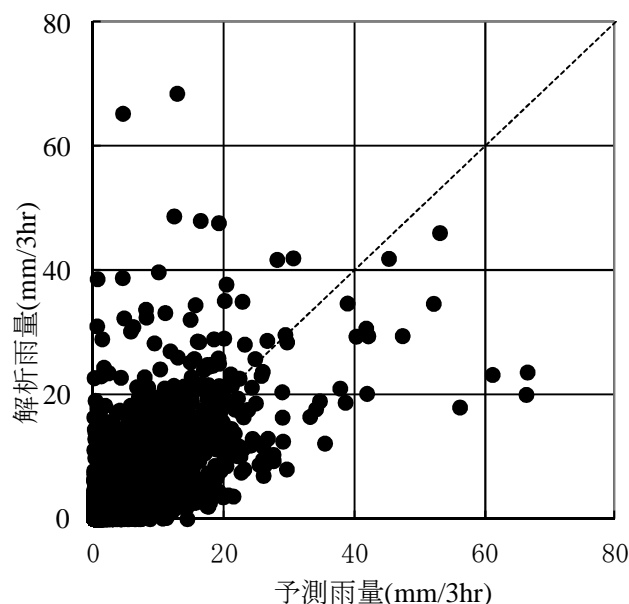


図 7.3.1 甲武橋上流域の予測雨量と実績雨量の比較

7.3.3 データ変換と定数の設定

二次元指数分布を適用できる条件として, 周辺分布が一次元指数分布であることが必要であるため, データ変換を実施した. 図 7.3.2 は雨量の $1/2$ 乗と確率密度を片対数紙

に示したものである．尺度母数を平均値として，雨量と確率密度の関係を示すと実績とほぼ一致し，雨量の $1/2$ 乗を用いて指数分布を適用できることが確認できた．データの統計的性質は以下のとおりである．

ρ = 相関係数 = 0.87

σ_R = 実績雨量の $1/2$ 乗の平均値 $\bar{x}_R = 0.79 \text{ mm}^{1/2}/3\text{hr}^{1/2}$

σ_r = 予測雨量の $1/2$ 乗の平均値 $\bar{x}_r = 0.80 \text{ mm}^{1/2}/3\text{hr}^{1/2}$

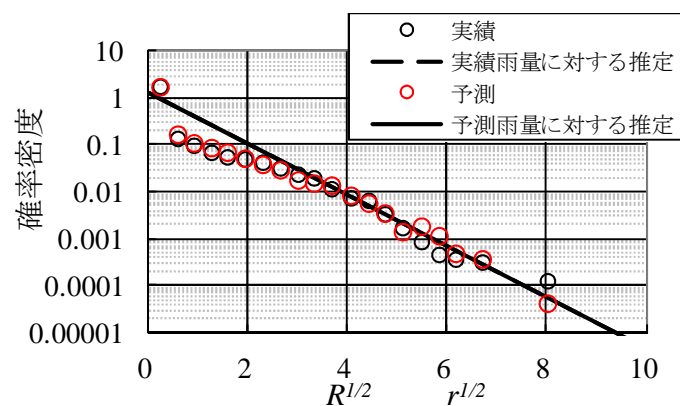


図 7.3.2 雨量の降雨分布 ($R^{1/2}$, $r^{1/2}$)

7.3.4 誤差分布の考察

前項の統計量を採用した結果，周辺分布の実績値との適合度は図 7.3.3 のとおりで，雨量が $10\text{mm}/3\text{hr}$ 以下の区間でやや適合していないが，雨量が大きい区間は適合している．確率密度分布は図 7.3.4 のとおりで，サンプル数が多い $20\text{mm}/3\text{hr}$ 以下の区間では適合度がよいと判断できる． $20\text{mm}/3\text{hr}$ 以上になるとサンプル数が少なくなり，適合性の判断が難しいが，推定した確率密度分布の中央付近に実績データが集中しており，大きな間違いはないと判断した．設定した確率密度分布を把握するために，条件付き確率分布を図 7.3.5，予測雨量と信頼区間の関係を図 7.3.6 に示す．図 7.3.5 では，雨量が小さい区間は指数分布で，雨量が大きくなると正規分布に似た分布になることがわかる．図 7.3.6 は予測雨量が与えられたときの予測雨量の信頼区間を示したもので，3 時間雨量が 100mm の場合，95%信頼区間は $40\sim 130\text{mm}$ であることがわかる．

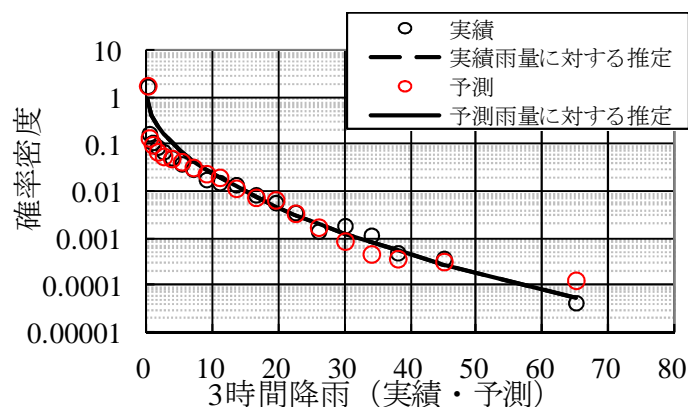


図 7.3.3 3 時間予測及び実績雨量の周辺分布

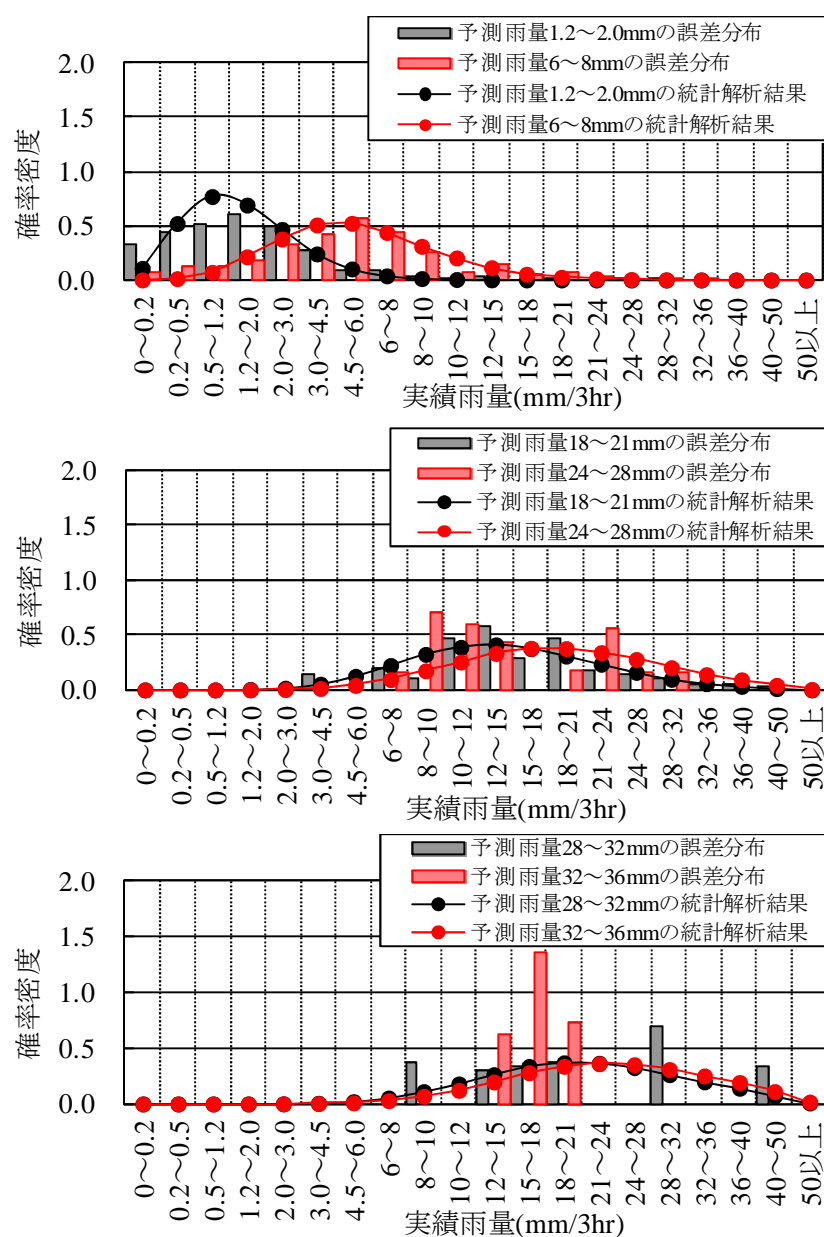


図 7.3.4 実績降雨の条件付き確率分布

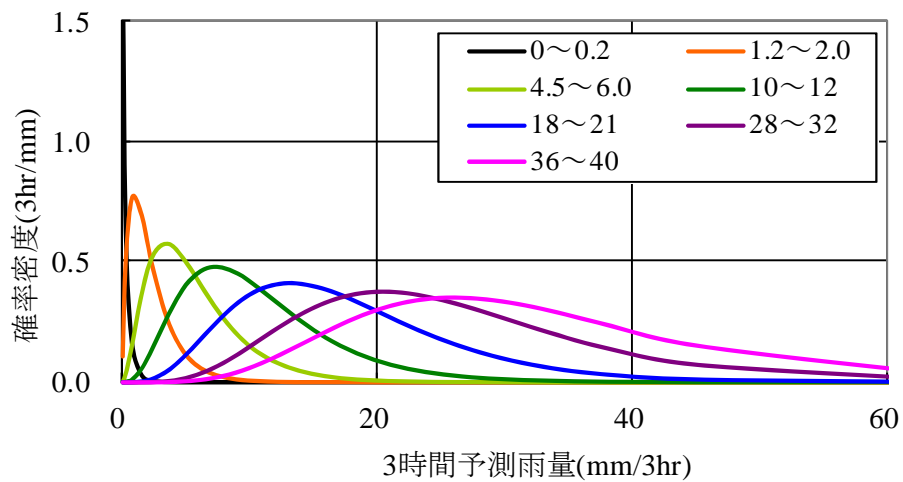


図 7.3.5 予測降雨の条件付き確率分布

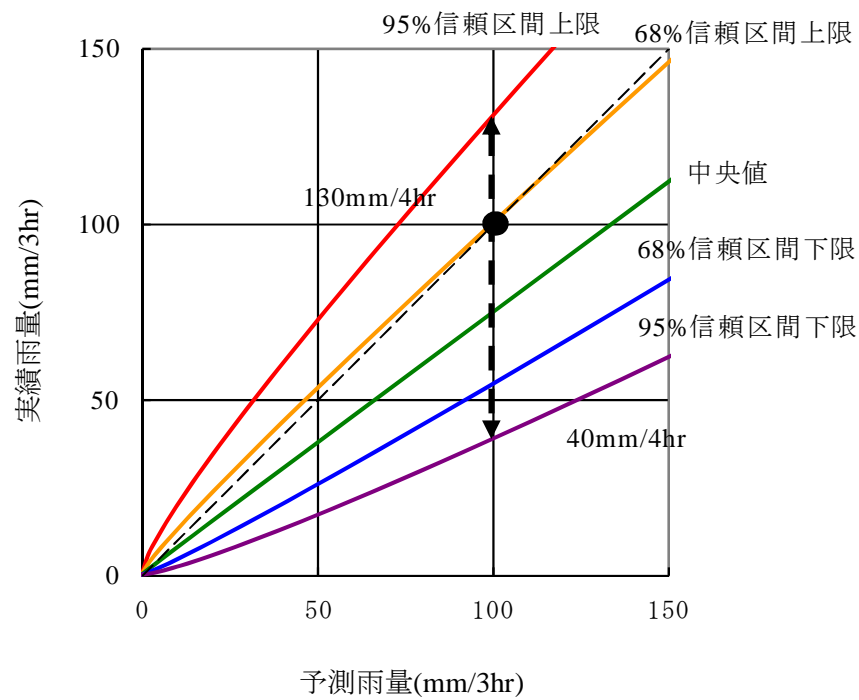


図 7.3.6 予測降雨の信頼区間

7.4 水位予測モデルの構築

7.4.1 粒子フィルタ

粒子フィルタにおける計算の流れは図 7.4.1 のとおりで、状態量を時間更新後に、分布型モデルで観測値推定を行い、観測値と観測推定値をもとに状態量を更新するものである。観測値更新前の粒子の重みは $1/n$ であるが、更新後には観測値により重みが増減する。この重みを更新前と同じ重みにする過程としてリサンプリング⁴⁾を行った。リサンプリング後の粒子は重みが $1/n$ になっているので、これにモンテカルロ近似した予測雨量分布を与え、流出解析により予測水位の確率分布を算定することが可能になる。

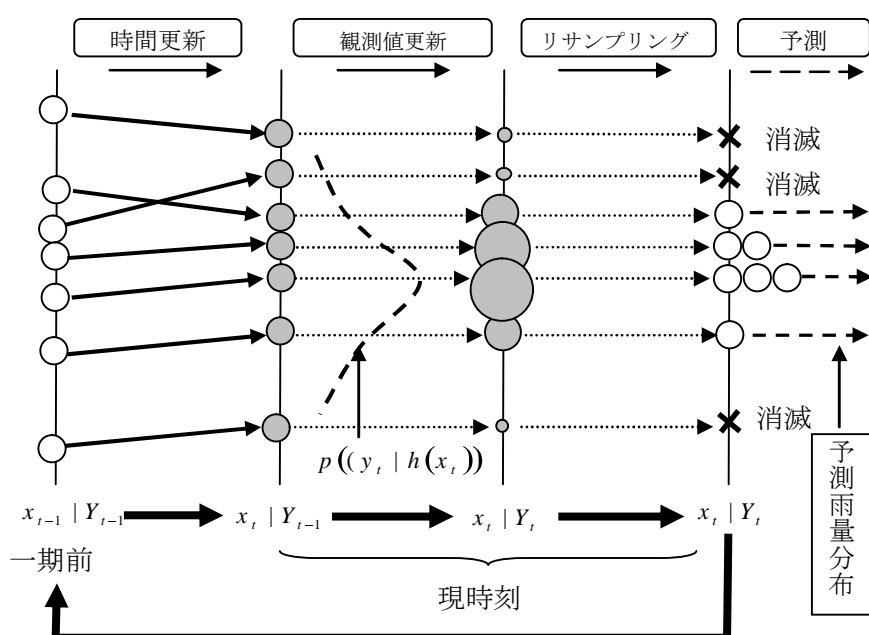


図 7.4.1 粒子フィルタと予測降雨の結合方法

7.4.2 現時刻における水位の誤差分布の算定方法

流出モデルは、図 7.4.2 の右側のとおり、流出解析における 6 時間前の状態量を流出解析の初期値とし、実績雨量を使用して、現時刻の水位を推定するものである。

現時刻の水位の誤差分布は、流出モデルの初期値の誤差と実績雨量の誤差により表現できると考えて、次の 2 つのパラメータを状態量として選定する。6 時間を選定した根拠は洪水到達時間程度の時間を遡ればよいと考えたからである。

- 1) 6 時間前の分布型流出モデルの初期の水分量を変化させる調整量
- 2) 前 6 時間の実績雨量を変化させる調整係数

6 時間前の初期値の調整は、分布型流出モデルのメッシュの構造が二段構造であるため、図 7.4.2 の左側のとおり上段の表層モデルに一定の水分の調整量を与え、30 分時間経過した後の状態を初期値とした。水分の調整量は正規分布を仮定し、平均 0mm 分散

を 25mm^2 とした．実績雨量を調整する調整係数の誤差も正規分布を仮定し平均 0，分散 4×10^{-4} と設定した．

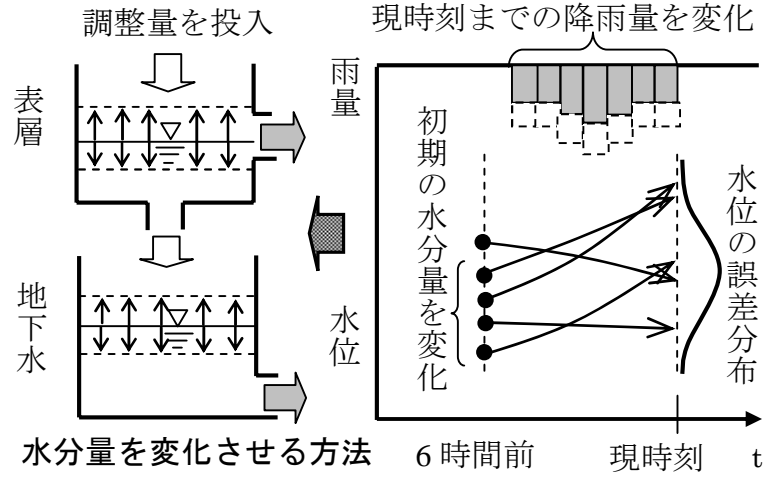


図 7.4.2 粒子フィルタと予測降雨の結合方法

7.4.3 粒子フィルタの基礎式

時間更新ステップと観測更新ステップからなり，確率密度関数の時間推移で表現すると式(4),(5)になる．なお，式の表現は片山²⁾にならった．

1)時間更新ステップ

$$p(x_t | Y_{t-1}) = \int p(x_t | x_{t-1}) p(x_{t-1} | Y_{t-1}) dx_{t-1} \quad (4)$$

2)観測更新ステップ

$$p(x_t | Y_t) = \frac{p(y_t | h(x_t)) p(x_t | Y_{t-1})}{p(y_t | Y_{t-1})} \quad (5)$$

ここに， x_t は状態量， $h(x_t)$ は状態量から推定した観測推定値， y_t は観測値， $Y_t = (y_t, y_{t-1}, \dots, y_2, y_1)$ は観測値の状態ベクトル， t は時間である．

状態量のモンテカルロ近似はディラクのデルタ関数を使用して(6)式で表現される．状態量の確率分布をモンテカルロ近似するため，自由に確率分布を設定することができるが，多量の粒子を必要とし， $n=500$ とした．

$$p(x_{t-1} | Y_{t-1}) \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta(x_{t-1} - x_{t-1}^{(i)}) \quad (6)$$

また状態量は，流出解析における初期の水分量と実績降雨の時間更新により変化するが，初期の水分の調整量と実績降雨にかかる係数は時間更新により変化しないものとして， $p(x_t | x_{t-1})$ は一様分布 $U(-\infty, +\infty)$ とする． $p(y_t | h(x_t))$ は分布型流出モデルによる観測推定値が観測値の周辺において(7)式で分布すると仮定する．流量の誤差分散は $\sigma_y^2 = 2 \times$

0.12 とし、流量が大きくなると誤差分散が大きくなるように設定した。

$$p(y_t | h(x_t)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left\{-\frac{(y_t - h(x_t))^2}{2\sigma_y^2}\right\} \quad (7)$$

7.5 河川水位の確率予測結果

2011 年台風 12 号を対象に水位予測を行った結果を示す。図 7.5.1 は、現時刻から 3 時間先の予測雨量と信頼区間を示したものである。また、図 7.5.2 は、現時刻における水位の信頼区間を示したものである。実績水位は、水位の予測分布の信頼区間内に入っており、概ね妥当な予測結果であると判断した。

3 時間後の予測結果の期待値と信頼区間、実績水位を比較したものを図 7.5.3 に示す。実績水位は概ね信頼区間内で変動し、予測雨量の誤差分布を反映した結果となっていることがわかる。また、3 時間先の水位の期待値のピークは実績ピーク値とおおむね一致しているが、ピーク発生時刻はやや遅れている。しかし、実績水位は予測の 95%信頼区間の上限を推移しており、洪水予報などの発表の遅れを回避できる可能性があるものと考ええる。

図 7.5.1 から予測雨量の 95%信頼区間は予測雨量の 0.4 倍から 1.3 倍の範囲となっているが、図 7.5.3 の予測結果では実績最大水位が約 2m であるのに対して、信頼区間は $\pm 0.5m$ 程度である。水位の信頼区間は雨量の信頼区間の大きさに比べて小さい結果となった。

この要因のひとつに、洪水の到達時間の予測雨量のリードタイムの関係があると考ええる。武庫川流域の洪水到達時間は約 6 時間程度で、予測雨量のリードタイムが 3 時間である。このため、水位の信頼区間の幅は、モデルの初期値の誤差、実績降雨の誤差の影響が含まれていると推測できる。

洪水ピーク前付近の 3 日 21 時における 3 時間先までの水位の累積確率分布を図 7.5.4 に示す。この図で基準水位を設定することにより、基準水位を超過する確率が把握できる。

同様に 2010 年 5 月の低気圧による洪水予測結果を図 7.5.5～図 7.5.7 に示す。図 7.5.5 の予測雨量では、ピーク時刻頃における 3 時間予測雨量は小さめとなっている。この結果、図 7.5.6 に示す水位予測結果は実績より低めになっている。しかし、図 7.5.7 に示す 3 時間先の予測結果の信頼区間には、実績水位がはいっており、3 時間前の当該時刻の予測水位に到達する可能性が高いもの判定できる。

2011 年台風 12 号による洪水における分布型モデルの水分量の調整量ならびに実績雨量にかかる調整係数の変動は、図 7.5.8 のとおりである。また、2010 年 5 月の低気圧による洪水における分布型モデルの水分量の調整量ならびに実績雨量にかかる調整係数の変動は、図 7.5.9 のとおりである。今回の設定条件では、2 洪水ともに初期の水分量の調整が支配的であり、その調整量の期待値は -60mm から 20mm まで大きく変動し

ている。これは、洪水立ち上がり前は流出モデルが実測よりも大きい流量を推定したので、このときのタンク内の水分量をマイナス方向に調整し、実測に適合させていた結果である。

また、洪水の立ち上がりのときに調整量がプラスの方向に大きく変動している。これは、利用した分布型モデル⁷⁾では、表層モデルが降雨に対して敏感に反応し、地下水モデルは緩やかに反応した特性を表した結果となっている。このような変動の特徴を踏まえると、洪水が立ち上がる前は、大きな調整量で地下水モデルの水分量を補正し、さらには雨量が多くなり、表層モデルの水分量が高くなると、少ない調整量で済んでいるといえる。

実績雨量の調整係数の期待値は 2 洪水ともに 0.9~1.1 の範囲で変動し、概ね 1.0 で推移している。さらに、解析値が大きくなる傾向の時には、調整係数を小さくなり、実測水位に合うように調整していることがわかる。

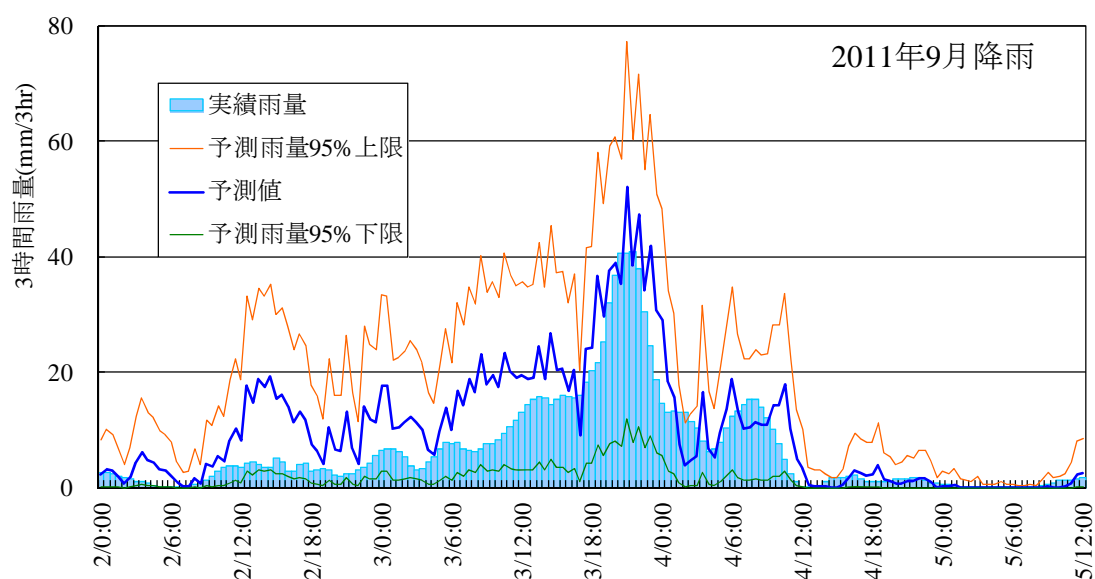


図 7.5.1 3 時間予測降雨とその信頼区間

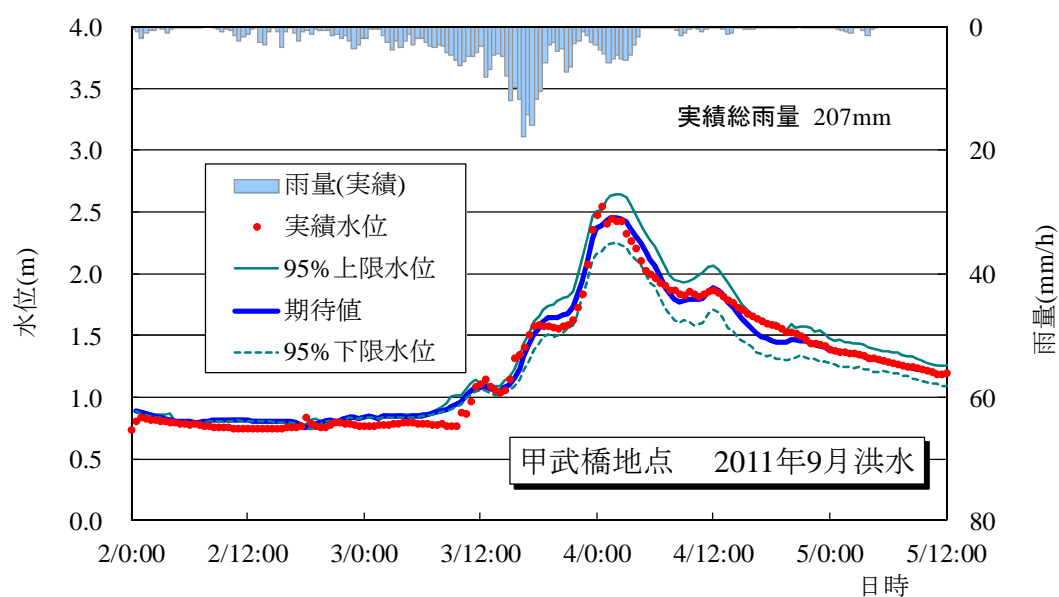


図 7.5.2 現時刻における水位の信頼区間

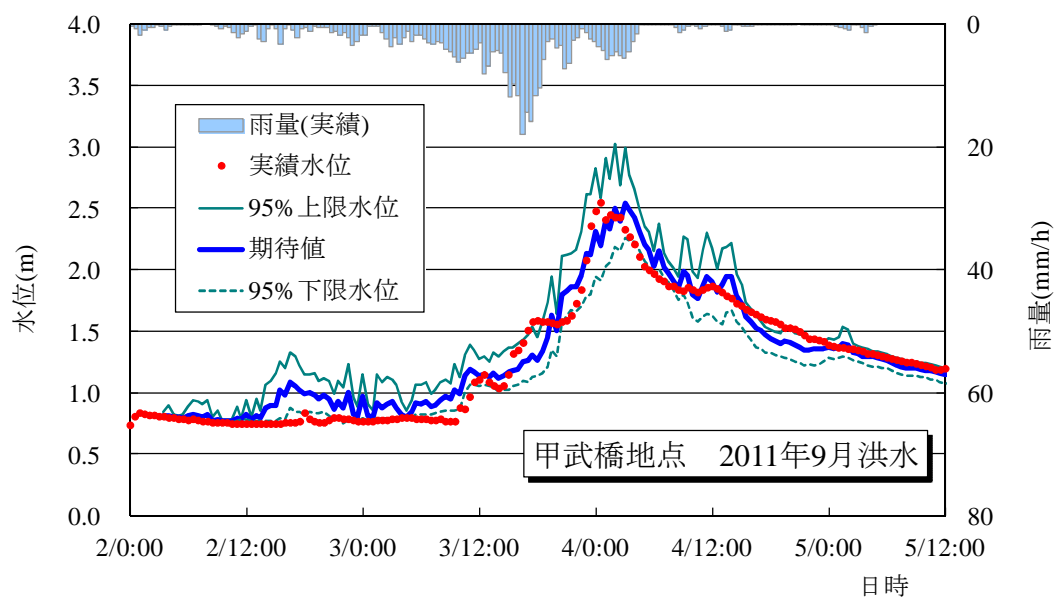


図 7.5.3 3 時間先予測における水位の信頼区間

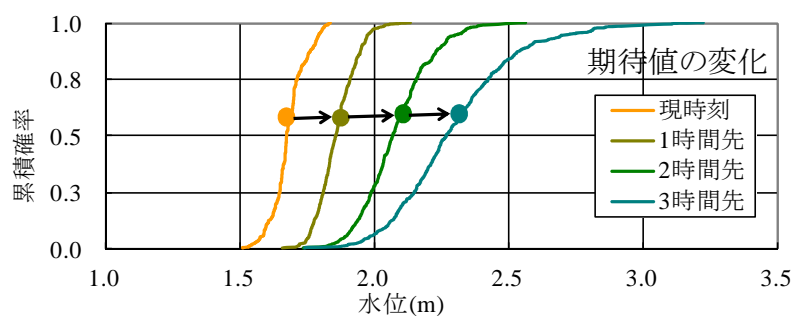


図 7.5.4 1～3 時間先予測水位の期待値の推移

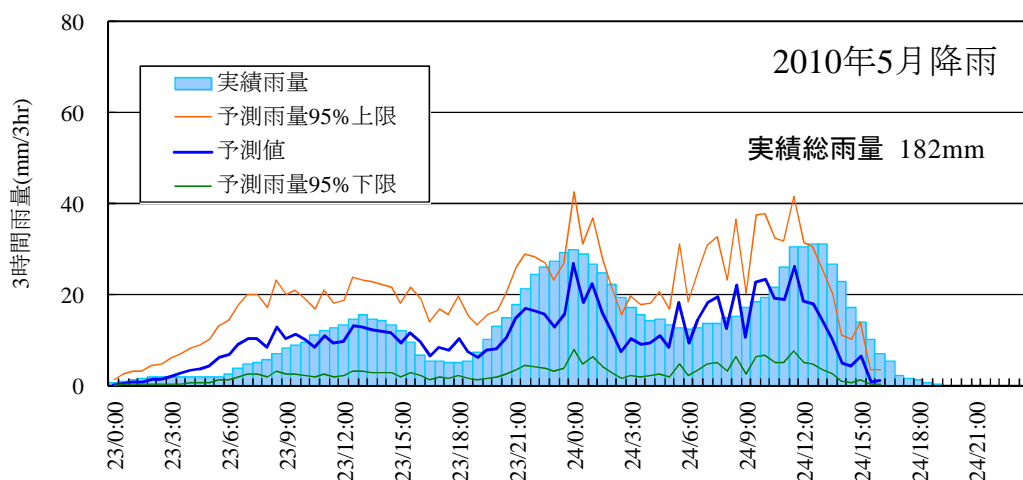


図 7.5.5 3 時間予測降雨とその信頼区間

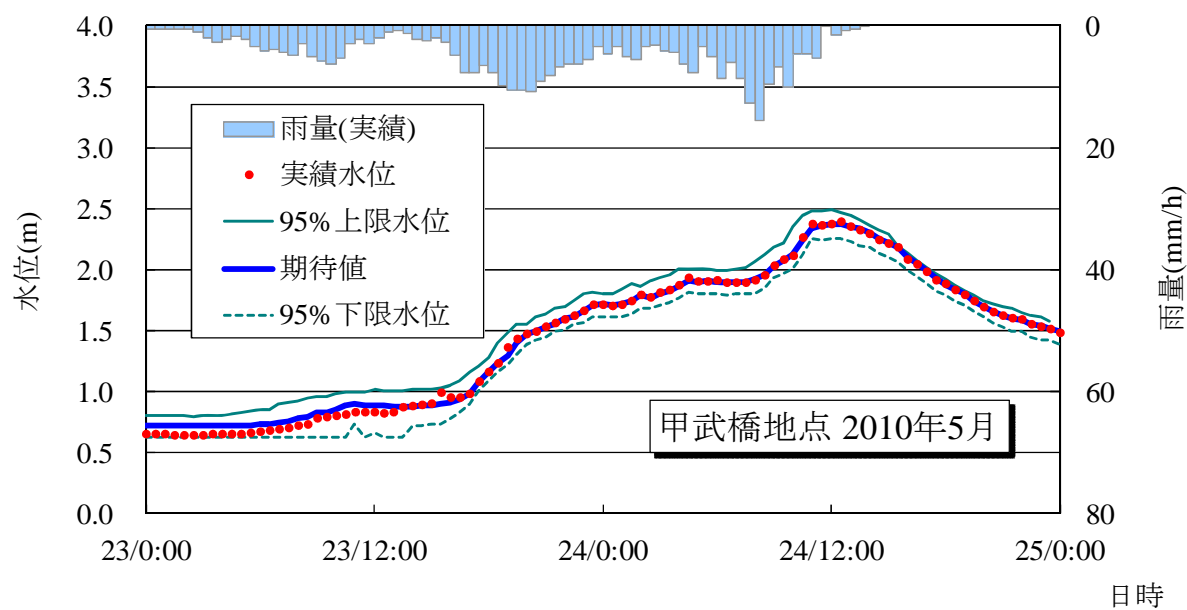


図 7.5.6 現時刻における水位の信頼区間

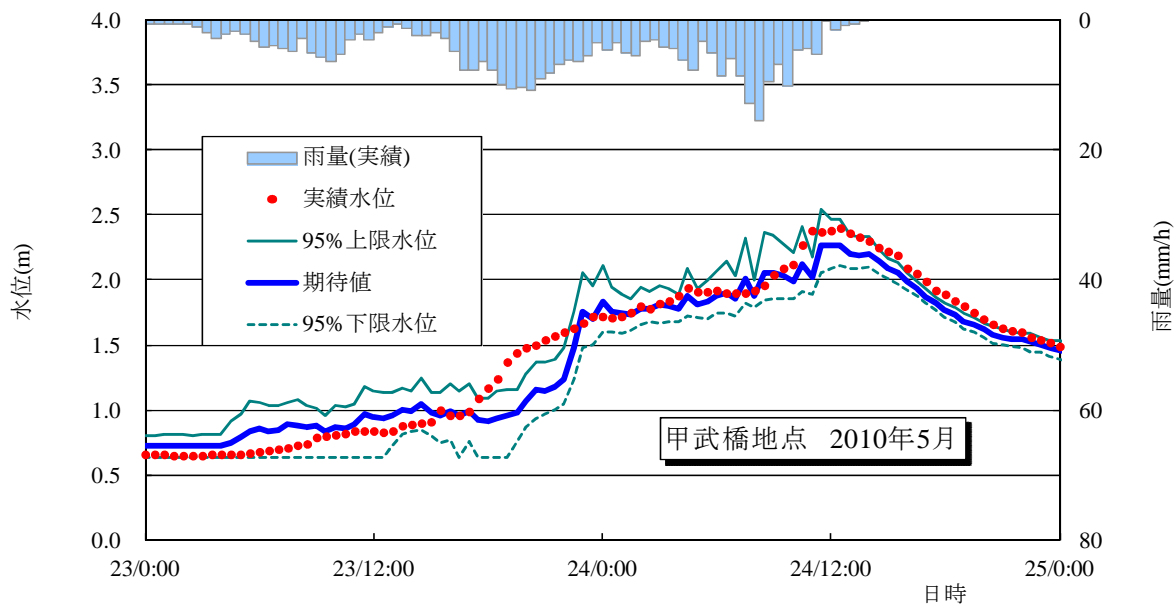


図 7.5.7 3 時間先予測における水位の信頼区間

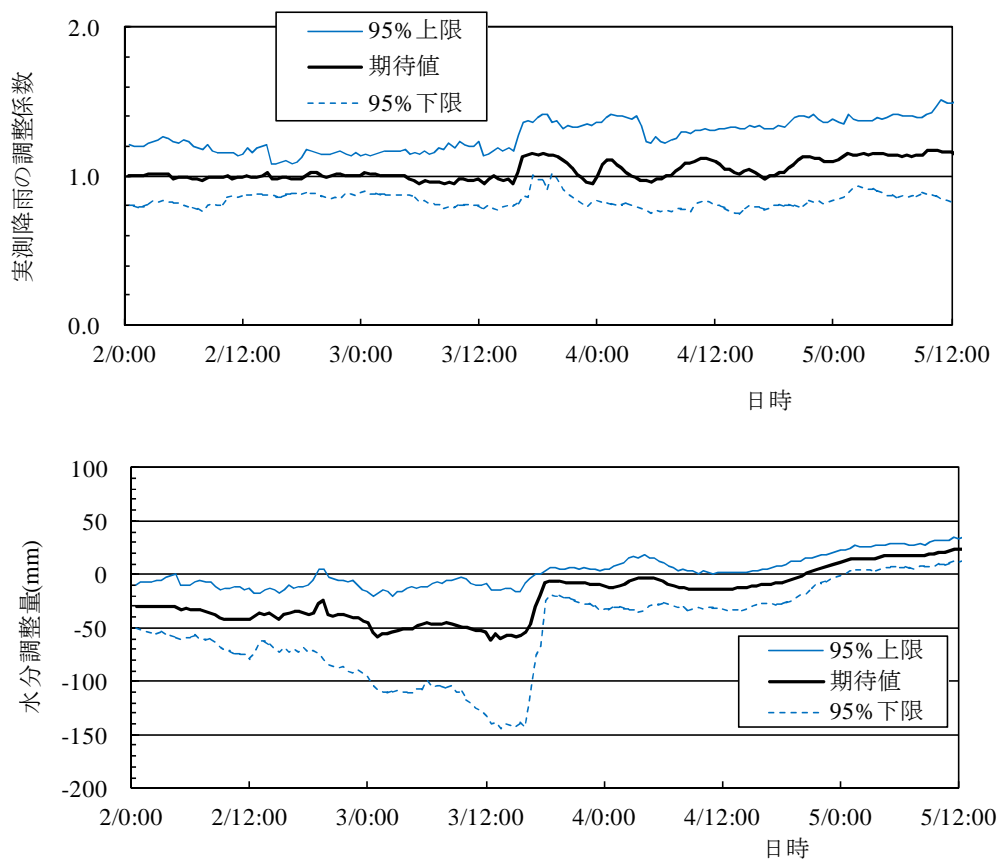


図 7.5.8 粒子フィルタによる平成 23 年 9 月洪水における実測補正時の降雨調整係数
と水分調整量の時系列変化

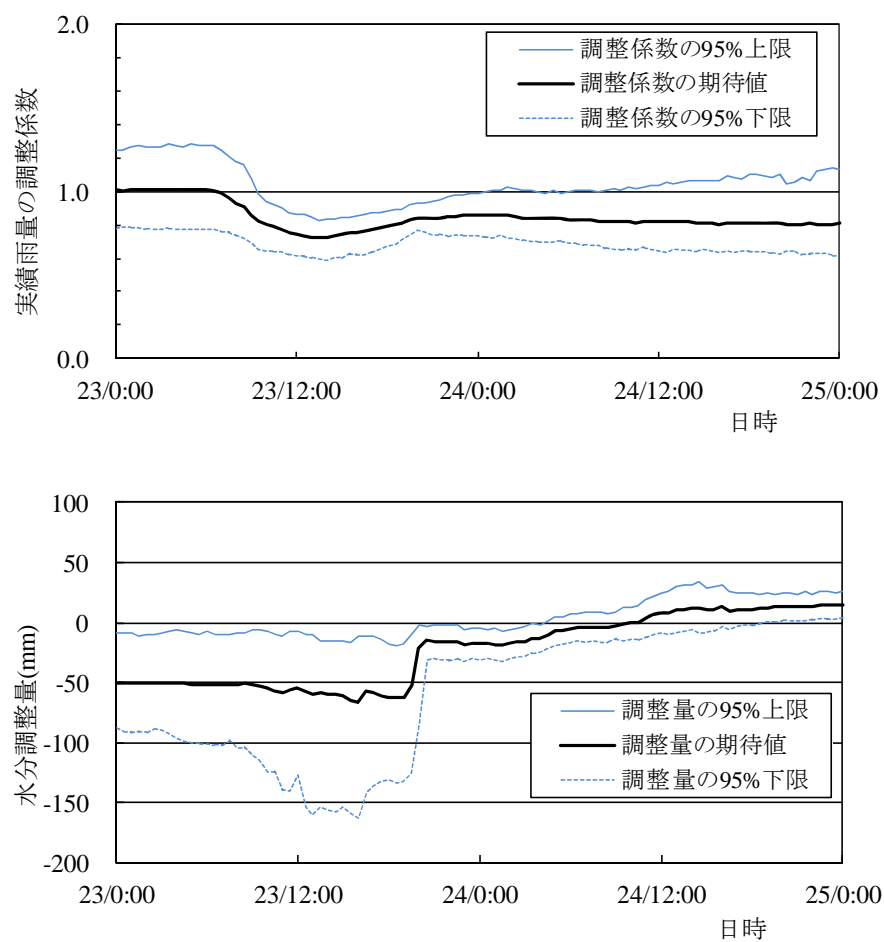


図 7.5.9 粒子フィルタによる平成 22 年 5 月洪水における実測補正時の降雨調整係数と水分調整量の時系列変化

7.6 おわりに

本章は、予測雨量の持つ誤差を利用し、水位の確率分布を予測するシステムの構築を図ったものである。

本章で得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- ・粒子フィルタ法と予測雨量の誤差分布との結合により、分布型流出モデルを用いた水位予測の信頼区間と超過確率を推定するシステムの構築が可能であることが明らかとなった。これまで、集中型の流出モデルと予測降雨誤差分布を組み合わせて、水位の誤差分布を算定した事例はある³⁾¹¹⁾が、本章で対象にした分布型流出モデルと組み合わせた事例はない。そのため、今後の洪水予測システムの導入に際して、決定論的な予測結果を与えるシステムではなく、入力データの誤差から信頼幅を与える洪水予測システムの構築と、その精度が実用上有効であることを示した。
- ・予測雨量の誤差分布に二次元指数分布を適用した。周辺分布が一次元指数分布になるように $1/2$ 乗のデータ変換をすることにより、適合度のよい結果が得られた。また、定数は平均値と相関係数であり、これまでのガンマ分布を用いる場合と比較して、経験的な観点からシステムを構築することは少なくなると考えられる。
- ・洪水予測モデルに粒子フィルタを結合させて、1～6 時間先までの状態量を補正するモデルを構築した。このモデルから、予測と実績水位を比較した。その結果、実績水位が、現時刻に対する信頼区間内に入ることから手法の妥当性を検証できた。さらに、3 時間先では、信頼区間内で変動しているものの、予測雨量の誤差が反映された結果となっており、3 時間前の段階で、実績水位に到達する可能性が予想された。この結果より、信頼区間等の情報を有効活用することにより、洪水予報や水防警報などの判断が遅れを回避できる可能性を示した。

参考文献

- 1) 平成 23 年台風第 12,15 号による豪雨に関する研究会:研究報告, 天気, Vol.59, No.3, pp.43-49, 2012.
- 2) 片山徹, 非線形カルマンフィルタ, 朝倉書店, 2011.
- 3) 片山直樹, 星清, 橋本識秀: 予測雨量の誤差を考慮した実用的洪水予測モデルの開発, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol.60, 2003.
- 4) 北川源四郎: モンテカルロ・フィルタおよび平滑化について, 統計数理, Vol.4, No.1, pp.31-48, 1996.
- 5) 立川康人, 須藤純一, 椎葉充晴, 萬和明・キムスンミン: 粒子フィルタを用いた河川水位の実時間予測手法の開発, 水工学論文集, Vol.55, pp.S511-S516, 2011.2.
- 6) 田中耕司, 大八木豊, 杉浦正之: 粒子フィルタを用いた実時間確率洪水予測システムの開発, 土木情報学シンポジウム, 第 37 回, 2012.
- 7) 猪股広典, 深見和彦: 吉野川流域広域洪水危険度判断支援システムの開発, 河川技術論文集, Vol.13, pp.433-438 2007.
- 8) 中村和幸, 上野玄太, 樋口知之: データ同化: その概念と計算アルゴリズム, 統計数理, Vol.53, No.2 pp.211-229, 2005.
- 9) 気象庁予報部: アンサンブル技術の短期, 中期予報への利用 ~激しい気象現象の予測向上を目指して~, 数値予報課報告・別冊, Vol.52, 2006.
- 10) 矢野一樹, 滝口哲也, 有木康雄: 探索手法の切り替えを用いたサッカー映像におけるボール追跡システム, 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU), 2007.
- 11) 東海林勉, 星清, 藤田暁: 予測降雨情報の推定誤差に関する定量解析, 河川技術論文集, Vol.10, pp.53-58, 2004.
- 12) 長尾正志, 角屋睦: 二変数ガンマ分布とその適用に関する研究(1), 京都大学防研究所年報, Vol.13B, 1970.
- 13) 樋口知之: 粒子フィルタ, 電子情報通信学会誌, Vol.88, No.12, pp.994-999.

第 8 章 非線形フィルタリングを適用した淀川三川合流区間における水位予測システムの開発

8.1 はじめに

従来から観測されている地点雨量，水位観測の他，近年進展してきたレーダ雨量を用いることによって，台風，集中豪雨によって発生する洪水を予測することが容易になってきた．さらに，降雨～流出量への変換は，非線形性を考慮できる貯留関数法といった集中型モデルを用いられてきたが，最近では分布型流出モデルを用いた洪水予測モデルが構築されている．この理由として，レーダ雨量の時空間分布が直接的に入力条件になり，流域内のきめ細かい流量分布が把握できることにある．また，水位流量特性（以下 HQ と略す）から推定・予測流量を水位に変換し，水位観測所の基準水位に対する変化を把握できるようになっている．

洪水予測システムに関する総合的な研究として，淀川を対象にした事例がある．立川等¹⁾は，淀川水系全体に物理水文モデルを用いた実時間流出予測システムを公開している．

一方で，洪水予測を実施するにあたり，次の 2 つの課題が依然存在し，その結果の精度を低下させている．

①モデル・パラメータの最適化

②リアルタイムの流量・水位を説明する状態量の推定

①については，過去経験した洪水データに基づくモデルのパラメータを，経験的²⁾にあるいは遺伝的アルゴリズム³⁾などの数理工学的な手法から最適値を求めるなどの工夫が行われている．このような方法で算定された定数等は，HQ 式や降雨量の精度により影響を受けるが，洪水を増やすことでその精度を高めているものと考えられる．一方で，②については，過去から現時点の観測水位を説明するため，流域の状態量を推定する方法論の適用性が課題となる．一般に，観測水位に推定水位をフィッティングするために，観測水位を説明する状態量を補正し，流量・水位を推定する方法としてフ

フィードバックが適用されている。しかしながら、不定流モデルによる水位予測は、フィードバック手法として非線形性が強いこともあり、粗度係数の調整や、現時刻の観測水位にスライドで調整する方法を適用していたため、精度が低い状態であった。したがって、実運用で不定流モデルでの水位予測において精度の向上を目的とした非線形フィルタリング手法の適用性に関する研究は行われてこなかった。

このフィードバック手法については、従来から非線形フィルタリング手法⁴⁾⁵⁾、経験的な方法²⁾が用いられ、流域の特性やシステムの規模などを勘案し適用されてきた。例えば、立川等⁶⁾は、淀川水系桂川の流況の再現に一元・二次元不定流モデルを用い、計算水位を観測水位に同化させるために、粗度係数、流量のシステムノイズを与えて、Particle filter 法を適用し、流量を推定する方法を提案している。また、Montanari 等⁷⁾、Matgen 等⁸⁾、Giustatini 等⁹⁾は、1 次元不定流解析における河川水位と流量の不確実性による精度低下を Particle Filter で低下させることが出来ることを示したが、粗度係数については、流量を固定した際のトライアンドエラーで同定している。これらの研究を総合すれば、HQ 式の不確実性を解消するための方法として非常に有効であるものの、すべてのパラメータを対象にする場合、計算時間の制約を受ける洪水予測では、状態量の設定に課題を残しているものと考えられる。一方で、本章で対象にする複数の河川が合流し、背水の影響を強く受けるような、複雑な流況となるような場において、不定流モデルを用いた水位予測が有効であることも考えられる。

本章では、実運用上の不定流区間の水位予測の精度を向上させるために、粒子フィルタ法を適用すること、多くの状態量から所定の時間内に計算を終わらせるための粒子フィルタ法の適用性を検証することを目的とした。すなわち、淀川水系の洪水予測システム全体の一部として、淀川水系の木津川・宇治川・桂川が合流する前後の背水区間の水位予測システムのフィードバックとして、Particle Filter 法を適用し、将来の予測水位を推定する方法を提案するものである。

8.2 淀川水系洪水予測モデルの概要

8.2.1 分布型流出モデルの適用

分布型流出モデルは流域内全メッシュに鉛直方向に並べられた 3 層のモデル（表層、不飽和層、地下水層モデル）と河道モデルからなる。各層からの流出成分を落水線に沿った河道モデルに入力し、Kinematic Wave 法で河道流量を逐次計算するモデルである。このモデルの特徴としては、各層・各メッシュに土地利用、土壌、表層地質の水文学的な特性を反映したパラメータを設定できることである。本章では、猪俣等¹⁰⁾が適用したモデルを参考に構築したものであり、詳細については前述した第 6 章に詳述している。

また、淀川水系洪水予測における流出量については、上記のモデルを基本として予測しているが、これだけでは洪水の追跡が難しいため、図 8.2.1 に示す内水氾濫モデル、狭窄部上流の簡易的な氾濫モデル、ダムモデルが組み込まれている。モデルの諸元については、表 8.2.1 に示す通りである。

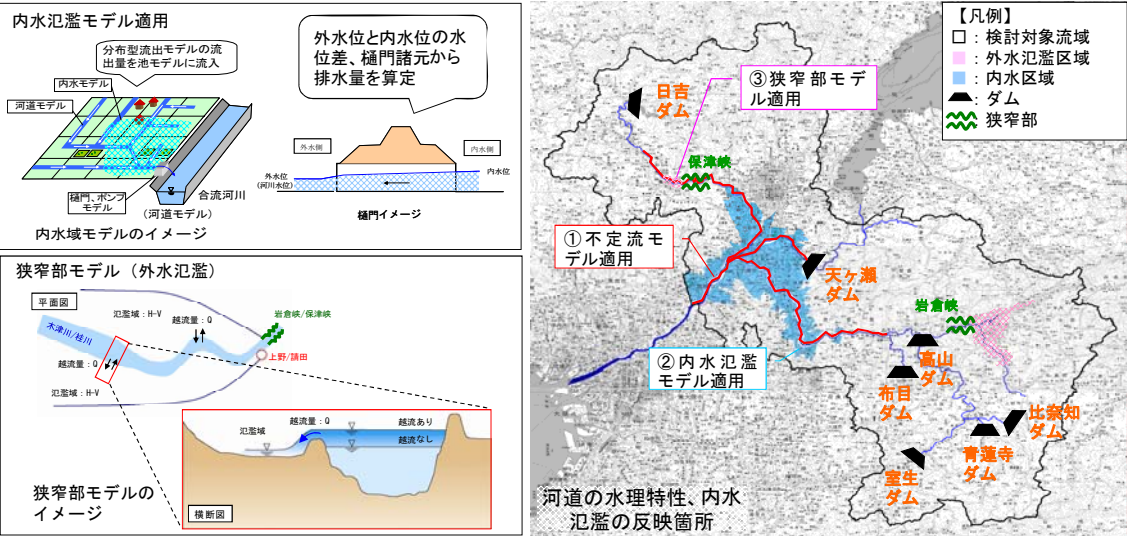


図 8.2.1 淀川水系洪水予測モデルの全体構成

表 8.2.1 分布型流出モデルの検証条件

項目	内容
流域面積	木津川流域：1,596km ² 24,932 メッシュ 桂川流域：1,100km ² 17,669 メッシュ 宇治川流域：506km ² 7,758 メッシュ 淀川下流域：231km ² 3,011 メッシュ
計算モデル	分布型流出モデル
分布型流出モデル定数	表層：森林，水田，畑，市街地，その他の計 5 分類について定数を設定 不飽和層：浸透能大，浸透能中，浸透能小の 3 分類 地下水層：浸透能大，浸透能中，浸透能小の 3 分類
雨量データ	X・C 合成レーダ雨量（国土交通省）解像度 250m レーダ・アメダス解析雨量（気象庁）解像度 1km
計算時間間隔	10 分
ダム・堰放流量	室生ダム，青蓮寺ダム，比奈知ダム，高山ダム，布目ダム，日吉ダム，天ヶ瀬ダム，瀬田川洗堰
内水氾濫	木津川流域 17 地区考慮 （大谷川，大森放水路，直田川，井路川，下狛排水区，菅井排水区，吐師排水区，南後背川，小川，加茂排水区，中村都市下水路，乗越川，才田川，中川，棚倉排水区，上狛川，蛇吉川） 桂川流域 6 地区考慮（梅津排水区，上鳥羽排水区，一ノ井用水路，西羽東師川，下植野排水区，西京極排水区）
外水氾濫	木津川流域 1 地区考慮（伊賀上野地区） 桂川流域 1 地区考慮（亀岡地区）

8.2.2 洪水予測システムの構築

淀川水系の洪水予測システムは、木津川・桂川・宇治川の上流部で分布型流出モデルを適用して、水位観測所毎に水位予測を行っている。さらに、図 8.2.2 に示す模式図のように、下流の三川合流部前後の区間においては、分布型流出モデルの流出量を上流端条件、枚方地点の HQ 式から算定した水位を下流端条件とした不定流モデルにより水位予測を行っている。

本章では、状態量として、加茂地点、桂地点、残流域、および枚方地点における調整流量(バイアス流量)にかかる係数を設定した。バイアス流量は、枚方地点の HQ 式の誤差を調整するために設定したものである。これにより、枚方地点の流量は不定流解析で算定された流量に、このバイアス流量が加算されたものとなっている。

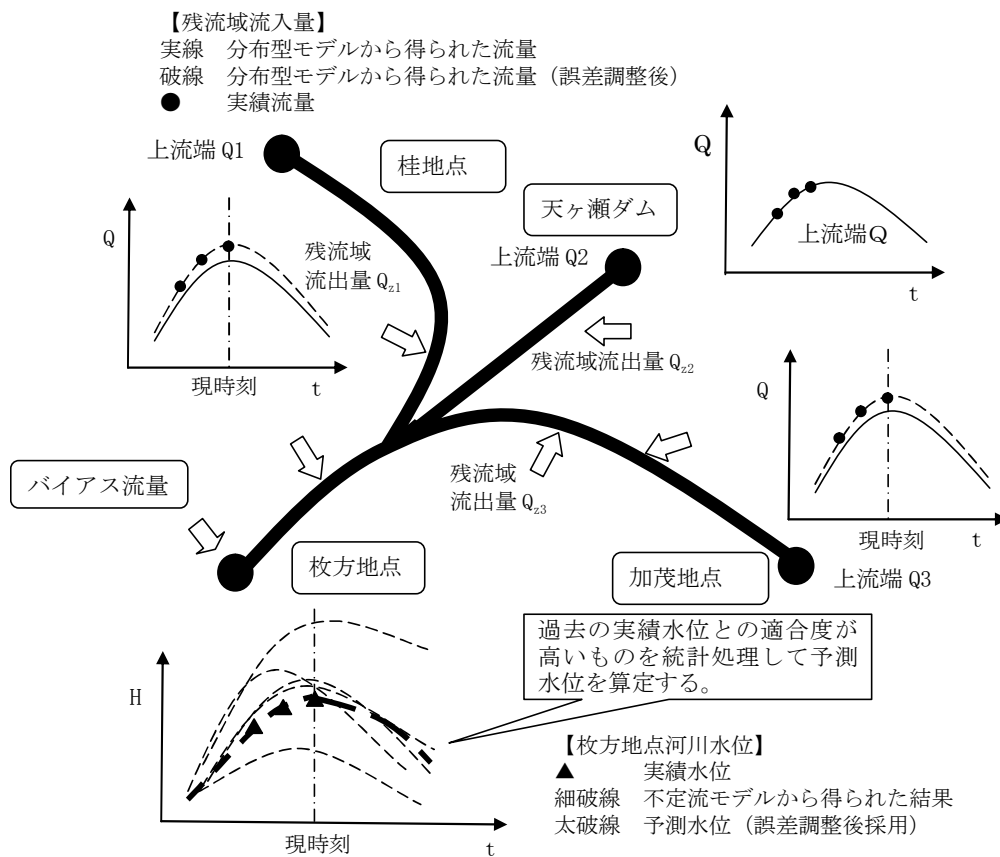


図 8.2.2 淀川一次元不定流モデルの概要

8.2.3 不定流モデルの構築

(1) 支配方程式

淀川三川合流部に適用する一次元不定流モデルの支配方程式を以下のように示す。対象区間が背水の影響を受けるため、Two step Lax Wendroff 法により、離散化した。

連続式

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (1)$$

運動方程式

$$\frac{1}{g} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q}{A} \right) + \frac{1}{g} \frac{Q}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q}{A} \right) + \frac{\partial H}{\partial x} = - \frac{n^2 |Q| Q}{A^2 R^{4/3}} \quad (2)$$

ここに、 Q は流量、 A は断面積、 H は水位、 R は潤辺、 g は重力加速度、 n は Manning の粗度係数、 q は横流入量、 x は河道縦断方向の軸、 t は時間方向の軸である。

(2) Two step Lax Wendroff 法による離散化

Two step Lax Wendroff 法(陽解法)で表現し(3)および(4)式に示すとおりである。

・ $1/2\Delta t$ について

$$\frac{1}{gA_{i+1/2}^{n+1/2}} \frac{Q_{i+1/2}^{n+1/2} - Q_{i+1/2}^n}{1/2\Delta t} - \frac{Q_{i+1/2}^{n+1/2^2}}{gA_{i+1/2}^n{}^3} \frac{A_{i+1}^n - A_i^n}{\Delta x} + \frac{\Delta H}{\Delta x} = - \frac{n^2 |Q_{i+1/2}^{n+1/2}| Q_{i+1/2}^{n+1/2}}{A_{i+1/2}^n{}^2 R_{i+1/2}^n{}^{4/3}} \quad (3)$$

・ Δt について

$$\frac{1}{gA_i^{n+1/2}} \frac{Q_i^{n+1} - Q_i^n}{\Delta t} - \frac{Q_i^{n+1/2^2}}{gA_i^{n+1/2^3}} \frac{A_{i+1/2}^{n+1/2} - A_{i-1/2}^{n+1/2}}{\Delta x} + \frac{\Delta H}{\Delta x} = - \frac{n^2 |Q_i^{n+1}| Q_i^{n+1}}{A_i^{n+1/2^2} R_i^{n+1/2^4/3}} \quad (4)$$

式(3)および(4)は流量について 2 次式であるので、これを解くこともできるが、絶対値の中の流量項を $1/2\Delta t$ あるいは Δt 戻すことにより流量の 1 次式として解いている。

・ $1/2\Delta t$ について

$$Q_{i+1/2}^{n+1/2} = \frac{\frac{\Delta t}{2gA_{i+1/2}^n} Q_{i+1/2}^n + \frac{Q_{i+1/2}^{n+1/2^2}}{gA_{i+1/2}^n{}^3} \frac{A_{i+1}^n - A_i^n}{\Delta x} - \frac{\Delta H}{\Delta x}}{\frac{\Delta t}{2gA_{i+1/2}^n} + \frac{n^2 |Q_{i+1/2}^n|}{A_{i+1/2}^n{}^2 R_{i+1/2}^n{}^{4/3}}} \quad (5)$$

・ Δt について

$$Q_i^{n+1} = \frac{\frac{\Delta t}{gA_i^{n+1/2}} Q_i^n + \frac{Q_i^{n+1/2^2}}{gA_i^{n+1/2^3}} \frac{A_{i+1/2}^{n+1/2} - A_{i-1/2}^{n+1/2}}{\Delta x} - \frac{\Delta H}{\Delta x}}{\frac{\Delta t}{gA_i^{n+1/2}} + \frac{n^2 |Q_i^n|}{A_i^{n+1/2^2} R_i^{n+1/2^4/3}}} \quad (6)$$

(3) 境界条件

不定流モデルの下流端の条件に枚方地点に、平成 23 年度の作成された河川管理用の H-Q 式を与える。

$$Q = 79.54(H + 5.52)^2 \quad (7)$$

Two step Lax Wendroff 法では，図 8.2.3 に示す差分格子で，下流端の格子には運動式を使用できず，連続式のみとなる．このため，水位，流量，H-Q 式のいずれかを与えることにより，下流端の水位・流量が求めることになる．下流端に H-Q 式を使用する場合，連続式と H-Q 式を連立することにより，水位・流量が求まる．陽形式では求まらないので，この部分のみは陰解法になっている．

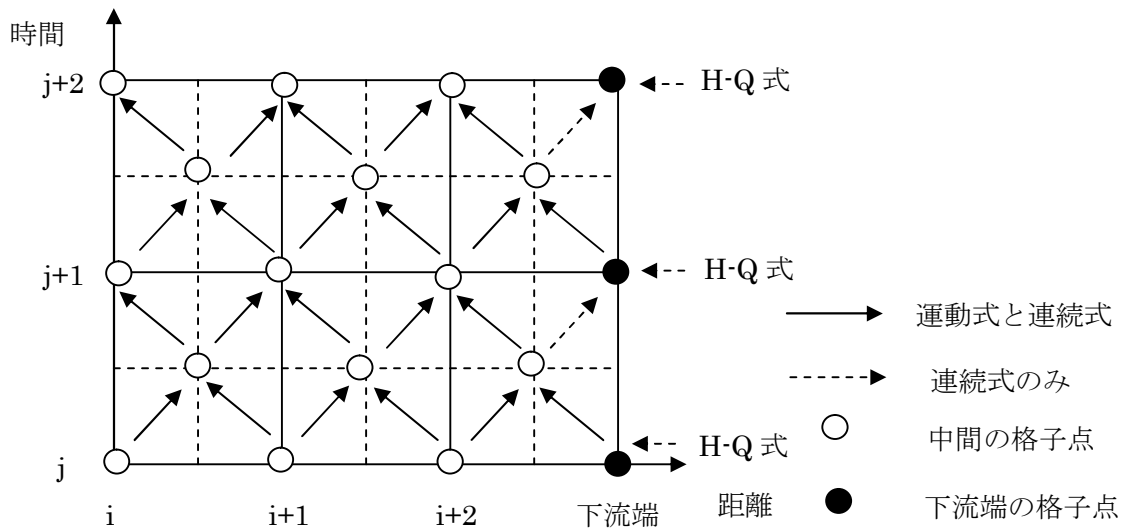


図 8.2.3 Two Step Lax Wendroffd 法における下流端の水位・流量の解法概念図

(4)合流点

合流点では，運動量と水位の連続式を満足させることが厳密であるが，ここでは，近似的に水位の連続のみとしている．合流による水位上昇は場合によっては考慮する必要があるが，合流による水位上昇は，合流点付近の粗度係数で調整するものとする．

(5)対象区間における粗度係数の設定

今回対象とする淀川(枚方地点上流)，木津川，桂川で，高水敷を流下するような大きな洪水では，高水敷の樹林帯等より流下を阻害するため，貯留効果のみを考慮する．すなわち，高水敷の粗度係数は大きめの数字を設定して，0.055～0.06 とした．低水路の粗度係数は近年生起した 8 洪水での実績水位に合うように設定した．その結果を表 8.2.2 に示す．これによれば，粗度係数は 0.035～0.045 となり，淀川で 0.035，宇治川で 0.040，木津川で 0.040，桂川で 0.035 となった．また，宇治川天ヶ瀬ダム下流付近で 0.045，木津川の加茂地点下流で 0.045 となり，上流の勾配の急な区間で粗度係数が大きくなっている．淀川の木津川合流点上流の区間で 0.045 と大きな粗度係数となったが，これは，合流によるエネルギーロスを含んだものと考えられる．

表 8.2.2 粗度係数の設定結果

河川	区間	粗度係数	備考
淀川	24.6k~35.4k	0.035	木津川合流点下流
	35.6k~37.0k	0.045	御幸橋付近下流
宇治川	37.0k~50.8k	0.040	新宇治橋付近下流
	51.0k~53.2k	0.045	天ヶ瀬ダム下流
木津川	合流点~3.6k	0.035	第二京阪道下流
	3.8k~19.8k	0.040	祝園水位観測所下流
桂川	20.0k~36.8k	0.045	加茂地点下流
	合流点~11.8k	0.035	桂地点下流

(6) 不定流解析の手順

図 8.2.4 に示すように、現時刻から 12 時間前を初期値として不定流計算を実施した。この計算手順は実際の洪水予測システムでも実施しているものである。これは、12 時間以前の過去水位から追跡し、現時刻-6 時間時点解析の初期として設定するために配慮した方法であり、経験的なものである。この時間では、加茂地点、桂地点および残流域の流出量にかかる係数は 1.0 とし、バイアス流量にかかる係数を 0.0 とし、調整をせずに、初期水位、流量の影響はない水位、流量を解析する。次に、不定流の初期水位・流量を仮定し、現時刻から 6 時間先の間での計算においては、現時刻から 6~12 時間先まで解析する。この間の計算においては、状態量として設定した調整係数を考慮した不定流モデルで解析を行う。

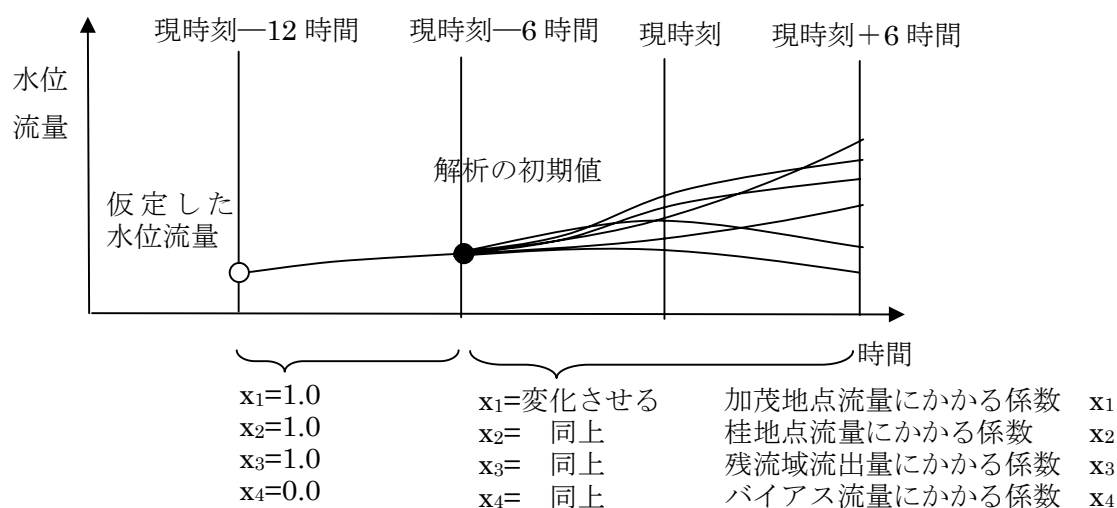


図 8.2.4 不定流解析手順の概念図

8.3 Particle Filter の適用

8.3.1 時間更新, 観測値更新ステップ

Y_t を現時刻における観測値で観測値の状態量行列(枚方地点流量) $Y_t=(y_t, y_{t-1}, \dots, y_2, y_1)$ を考え, 状態量は(8)式とする. 時間更新ステップ(9)式は, 一期前の現時刻における最適な状態量から現時刻の状態量を推定したときの確率分布の変化を示したものである. 観測値更新ステップ(10)式は観測値による状態量の確率分布の変化を示したものである. この式はベイズの定理そのもので, 時間更新した分布を事前分布, $p(y_t|g(x_t))$ を尤度とみなすと, $p(x_t|Y_t)$ が事後分布になる.

ここで, $p(x_t|x_{t-1})$ は時間更新による状態量の確率分布の変化を示しているが, 本モデルでは, 流量にかかる係数を状態量としているので, $p(x_t|x_{t-1})$ は一様分布 $U(-\infty, +\infty)$ とする.

状態量

$$x_t = [x_1(t) \quad x_2(t) \quad x_3(t) \quad x_4(t)] \quad (8)$$

時間更新ステップ

$$p(x_t | Y_{t-1}) = \int p(x_t | x_{t-1}) p(x_{t-1} | Y_{t-1}) dx_{t-1} \quad (9)$$

観測値更新ステップ

$$p(x_t | Y_t) = \frac{p(y_t | g(x_t)) p(x_t | Y_{t-1})}{p(y_t | Y_{t-1})} \quad (10)$$

ただし $p(y_t | Y_{t-1}) = \int p(y_t | x_t) p(x_t | Y_{t-1}) dx_t$, $g(x_t)$ は, 不定流モデルによる解析水位・流量である.

Particle Filter は時間更新ステップ, 更新ステップに(4)式を代入することにより得られる. \approx は左辺の積分が1になるように調整することを示している. $\delta(x)$ はディラクのデルタ関数で $x=0$ のときに1, $x \neq 0$ のときに0を示す.

$$p^{(i)}(x_{t-1} | Y_{t-1}) \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta(x_{t-1} - x_{t-1}^{(i)}), \quad p^{(i)}(x_t | Y_t) \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta(x_t - x_t^{(i)}) \quad (11)$$

代入後の式は(12), (13)式のとおりになる. なお, (12), (13)式は(11)式を代入することにより, 連続データを表現した式から離散データを表現する式に変化させため, 左辺の値にサフィックスがつく. このサフィックスは i 番目の粒子であることを示している. また, (13)式の分母は定数で $p(x_t|Y_t)$ の合計が1になるように調整する係数と考えることができる.

1)時間更新ステップ

$$p^{(i)}(x_t | Y_{t-1}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p(x_t | x_{t-1}) \delta(x_{t-1} - x_{t-1}^{(i)}) \quad (12)$$

2) 観測値更新ステップ

$$p^{(i)}(x_t | Y_t) = \frac{p(y_t | g(x_t)) \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta(x_t - x_t^{(i)})}{p(y_t | Y_{t-1})} \quad (13)$$

8.3.2 リサンプリング

リサンプリングには重みの大きい順に抽出する方法（重み順方式）とランダムサンプリングがある．重み順方式は，粒子の中から重みの最大値を抽出する等の計算が必要になり，ランダムサンプリングより時間がかかる．しかし，重み順方式は重みの小さい粒子が選択される確率が低いため，粒子数が少ない場合でも解が安定する傾向にある．このため，本システムでは重み順方式を採用した．しかし，重み順方式は粒子の退化が著しいので，観測ノイズの与え方に留意する必要がある．

図 8.3.1 のとおり粒子の重みを高さで示した棒グラフがあり，棒の高い順にサンプリングする方法を採用方法である．具体的には下記に示した手順である．c)と d)の手順を繰り返し行うことにより， n 個の粒子が再生される．

- n 個の粒子があり，個々の粒子の重みを $p(x_t^{(i)} | Y_t)$ と表現する．
- まず， $p(x_t^{(i)} | Y_t)$ が最大のものから 1 個の粒子を選定する．
- $p(x_t^{(i)} | Y_t)$ を選定したので $p(x_t^{(i)} | Y_t)$ の重みを $1/n$ にする．
- c)で得られた粒子群から適合度が最もよい 1 個を選定する．

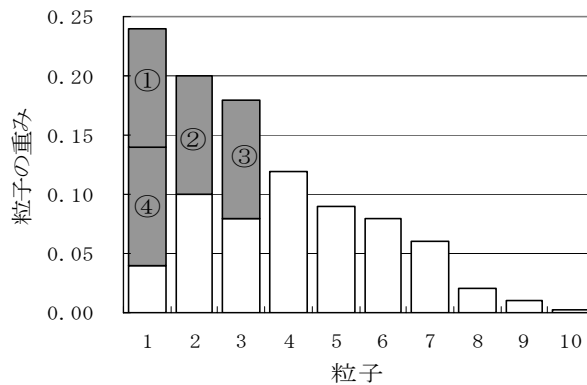


図 8.3.1 重み順方式の概念図

8.3.3 システムノイズの追加

リサンプリング後の粒子には同じ値のものが存在する．このため，状態量の分布形を変化させずに，ランダムなシステムノイズを追加する．これは，システムノイズを追加しないと，値が同じ粒子が増加してしまい，観測値が急激に変動したときに，最適解が得られない可能性が生じること避けるために講じた処置である．

8.3.4 Particle Filter の時間更新, 観測値更新ステップおよびリサンプリングの概念

Particle Filter の概念は 図 8.3.2 のとおりに整理できる. 先にも述べたように時間更新により状態量は, 次ステップに引き継がれる. その状態量から枚方地点の流量の観測値の推定分布を作成し, 尤度により観測値更新を行うものである.

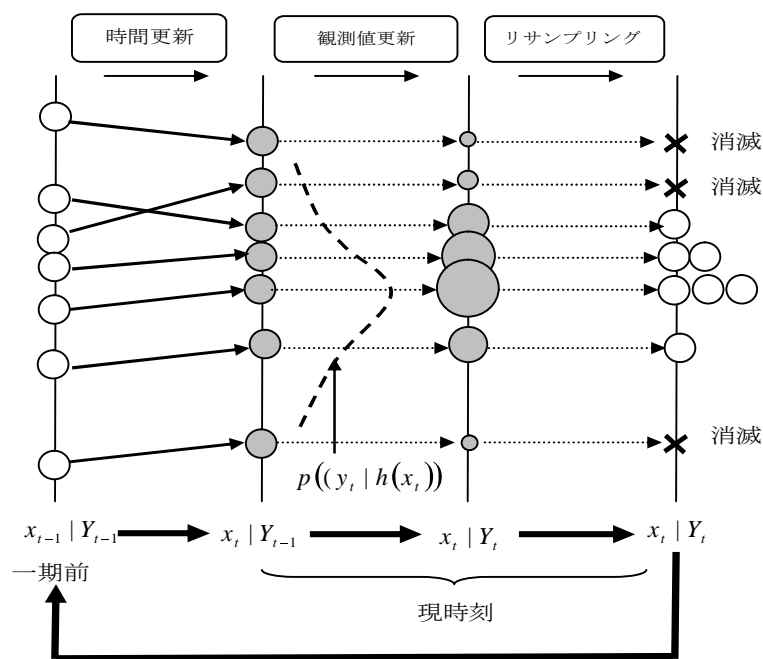


図 8.3.2 Particle Filter の時間更新・観測値更新の概念図⁶⁾

8.4 流量および水位の予測方法

8.4.1 枚方地点の流量の予測方法

Particle Filter を適用するにあたり試算を繰り返した．この理由として，誤差の設定が Particle の幅が観測値から外れる可能性があり，その場合，精度の悪い観測推定値を与えること懸念された．この試算の結果，Particle Filter の観測誤差とシステム誤差を，以下のように設定した．Particle Filter における観測値と推定値との差と粒子の重みの関係は(14)式を用いた．枚方地点の流量の観測誤差は HQ 換算流量の 10%とした．またシステムノイズは正規分布を仮定し，ノイズを 0.05 とした．

$$f(Q_c - Q_o, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Q} \exp\left\{-\frac{1}{2} \frac{(Q_c - Q_o)^2}{\sigma_Q^2}\right\} \quad (14)$$

ここに Q_c は解析流量， Q_o は観測流量， σ_Q は観測誤差（誤差分散の平方根）である．

枚方地点の水位と流量の予測は図 8.4.1 に示す手順で解析を実施した．図 8.4.1 に示す左側の手順は，状態量を最適な状態に保つフィルタリングである．最初是一期前の状態量から時間更新を行う時間更新ステップで，状態量是一期前とほとんど同じと仮定し，システムノイズのみを追加するものである．次に，観測値から尤度を算定し，尤度により状態量を最適な分布に変換する観測値更新ステップを行い，粒子の重みを同じにするリサンプリングを行う．

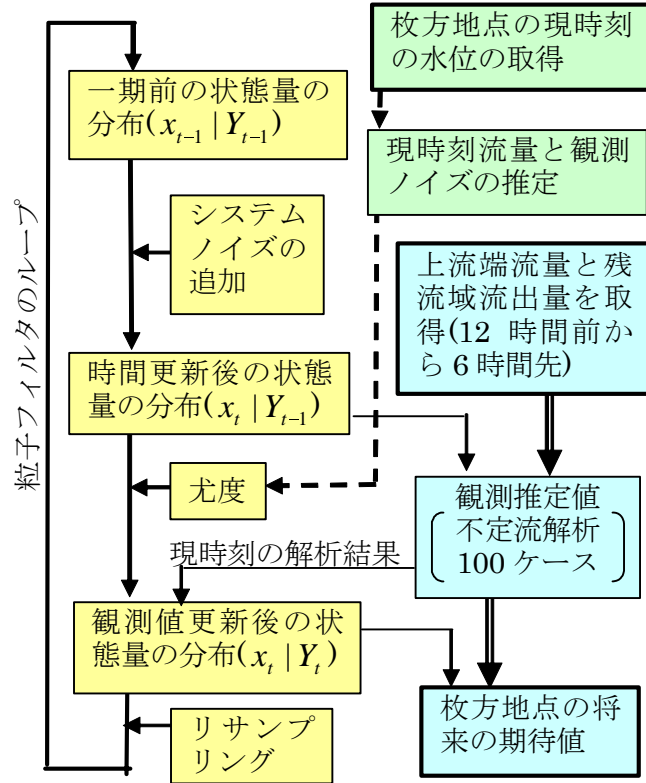


図 8.4.1 粒子フィルタと不定流解析の手順

これと並行して，右側の手順は不定流解析の流れを示している．分布型流出モデルから，上流端及び残流域の流量を取得し，時間更新後の状態量の分布から，水位及び流量の分布を算定する．次に観測値更新後の状態量の分布から，将来の期待値を推定する．

図 8.4.2 は枚方地点の流量の解析結果と確率分布を示したものである．不定流解析は現時刻から遡った 12 時間前から開始する．これは，現時刻までの水位および流量の誤差は，洪水到達時間前における上流端流量の誤差が大きな要因であると想定した．

現時刻においては，H-Q 換算流量から推定した尤度を用いて，観測更新後の流量の確

率分布を推定する．また，将来における期待値は，現時刻の状態量が継続するものとして推定する．将来においては，状態量は変化しないが，不定流解析による予測流量の確率分布が変化することになる．

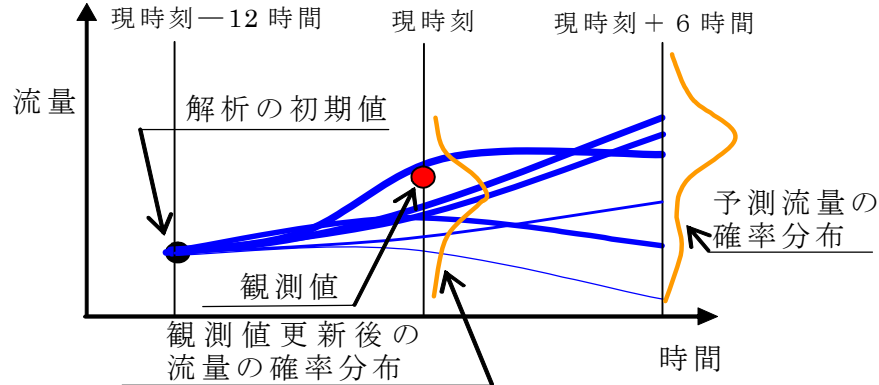


図 8.4.2 予測流量の確率分布の算定の概念図

青線は不定流解析結果を示し，線の太さは，観測値更新後の重みの大きさを示している．

8.4.2 枚方地点上流の水位の予測方法

枚方地点の予測を重視した結果モデルであるが，不定流解析結果は，枚方地点上流の水位の予測においても有効な情報であることがわかった．このため，不定流解析結果を用い，上流の水位観測値に適合する結果を推定するために，再度重みを解析し，加重平均により水位を予測した．水位観測値と解析結果の重みは式(15)を採用した．水位の観測誤差は 0.5m，誤差の相互相関係数を 0.3 と設定した．

$$f(X_c - X_o, \Sigma) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^m |\Sigma|^{\frac{m}{2}}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} |X_c - X_o| \Sigma^{-1} |X_c - X_o|^T \right\} \quad (15)$$

ここに X_o は観測値の行列， X_c は解析水位の行列， Σ は誤差共分散行列， m は水位観測値の個数である．

図 8.4.3 は，上流の水位観測所の水位の推定するための方法を示している．枚方地点の流量のフィルタリングに用いて不定流解析の水位分布を用い，観測値から得られた重みにより，期待値を推定する方法とした．

さらに，現時刻の解析値が確率分布の期待値となるため，現時刻水位と観測水位に若干の差が生じる．そこで，この差を解消するために，期待値を現時刻の観測値にスライドさせることとした．

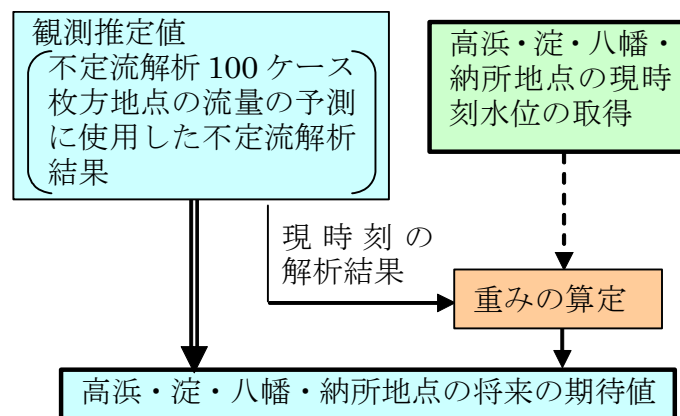


図 8.4.3 上流水位の予測手順

8.5 実績洪水の解析

8.5.1 現時刻におけるフィルタリング

分布型流出モデルから算定した加茂, 桂地点の流量と実績の天ヶ瀬ダム放流量を上流端の条件とし, 分布型流出モデルで推定した残流域の流出量を横流入とし, 不定流解析を行った. 対象洪水は, 近年の洪水で平成21年10月8日洪水, 平成23年9月2日～5日洪水および平成23年9月20日～23日洪水である. 平成21年10月8日洪水は, 木津川の流出が卓越し他の河川では目立った流出量はない洪水であり, 残り二洪水は三河川とも目立った流出量がある.

図8.5.1は, 平成23年9月2日～5日洪水における解析結果を示している. この図は上流端流入量と残流域流出量合計のハイドログラフを示している. 洪水は木津川流域から始まり, 洪水の初期はほとんどが木津川流域からのものであることがわかる. その後に残流域からの流入量, 天ヶ瀬ダムの放流量が増加し, 最後に桂川で流量が増加している. このように時刻により流量の構成比が変化するため, 三川合流部分は複雑な流況になっていることがわかる.

現時刻でのフィルタリングの結果には, 流量の確率分布がわかるように流量の期待値と95%信頼区間のハイドログラフを示している. また, 状態量の変化がわかるように, 流量の補正係数の時間変化を示している. 補正係数は, 実績流量と適合するように時間的に変化していることがわかる. 枚方地点のバイアス流量の補正係数については, ハイドログラフの立ち上がりからピークにかけて約二倍の変化を示している. これは, 洪水後期の背水の影響によりHQ式が変化している可能性が高く, その変化量が補正されていることを示している.

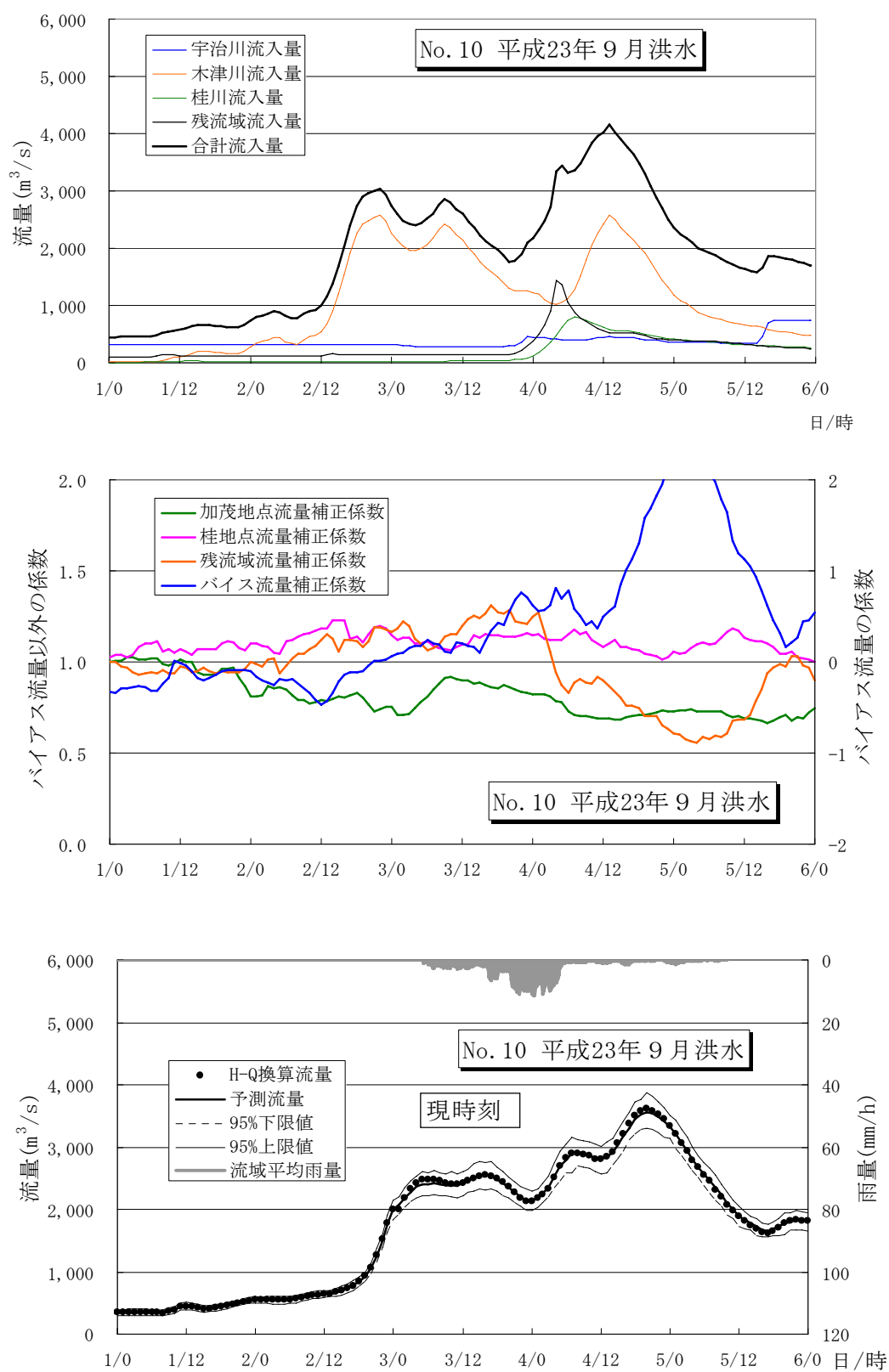


図 8.5.1 平成 23 年 9 月 2 日洪水におけるフィルタリング結果

8.5.2 現時刻からの予測水位の解析結果

現時刻におけるフィルタリング結果は、いずれの洪水においても、適合性は高いことがわかった。この時点から将来の予測水位の結果を算出した。表8.5.1および表8.5.2には、実績洪水の水位ハイドロと、現時刻、3時間先、6時間先の予測水位との比較を、二乗平均誤差、Nash値を指標として評価した結果を示している。また、図8.5.2には平成21年10月8日洪水、図8.5.3には平成23年9月2日～5日洪水、図8.5.4には平成23年9月20日～23日洪水における枚方・八幡・飯岡・淀・納所地点の実績水位に対して3,6,12時間先の予測結果と実績の水位を比較したものである。

平成21年10月洪水における枚方地点の適合性については、他の二洪水に比べて、精度の低い結果となっている。これは、木津川の八幡地点における立ち上がり部分の予測が枚方に伝搬したものである。この地点は、低水路幅が広く、水深が浅い河道であり、水位の低いときには貯留効果を考慮しないと行けない場所である。今後は水位の高いときにどの程度の貯留効果が影響するのかを含めた不定流解析の安定性が課題として残っている。

一方で、平成23年の二洪水について、かなりの精度で予測ができていることがわかった。各地点の基準水位に比べれば、大きな洪水とは言えないものの、十分な精度の予測結果を得ている。平成23年9月2日～5日洪水では、6時間先の予測水位の二乗誤差が30cm前後であり、平成23年9月20日～23日洪水では、30cm以内に抑えられている。数時間先までの精度として、この程度の誤差は、十分な精度を有しているものと判断した。また、波形の適合性を評価する指標として、6時間先までの波形に対するNash値で見ても、ほとんどの地点で90%以上となっている。

以上の結果から、淀川下流域の三川合流前後の区間に適用した水位予測手法が妥当であると考えられる。不定流モデルを基本とし、過去から現時刻までのデータ同化手法として、採用したParticle Filter は有効な方法であると考えられる。また、現時刻からの将来予測の結果から、状態量として採用した流量の補正係数の妥当性も説明できたものと考えられる。

表 8.5.1 予測水位の二乗平均誤差による適合性の評価

地点	平成21年 9 月洪水			平成23年 9 月洪水 台風12号			平成23年 9 月洪水 台風15号		
	現時刻	3 時間先	6 時間先	現時刻	3 時間先	6 時間先	現時刻	3 時間先	6 時間先
枚方	0.458	0.509	0.853	0.201	0.116	0.192	0.171	0.137	0.242
高浜	0.353	0.456	0.721	0.289	0.132	0.219	0.173	0.111	0.193
宇治川三川	0.367	0.501	0.813	0.254	0.139	0.223	0.089	0.111	0.181
淀	0.233	0.433	0.674	0.274	0.140	0.221	0.284	0.100	0.155
向島	0.148	0.290	0.434	0.387	0.191	0.285	0.593	0.095	0.159
八幡	0.714	0.609	0.936	0.251	0.188	0.303	0.157	0.184	0.283
飯岡	0.596	0.348	0.532	0.138	0.105	0.150	0.271	0.115	0.150
納所	0.260	0.429	0.620	0.331	0.201	0.292	0.134	0.185	0.266
羽束師	データ無し			0.196	0.196	0.269	0.163	0.134	0.220
平均	0.391	0.447	0.698	0.258	0.156	0.239	0.226	0.130	0.206

水位誤差 ±0.3m以内

表 8.5.2 予測水位の Nash 値による適合性の評価

地点	平成21年 9 月洪水			平成23年 9 月洪水 台風12号			平成23年 9 月洪水 台風15号		
	現時刻	3 時間先	6 時間先	現時刻	3 時間先	6 時間先	現時刻	3 時間先	6 時間先
枚方	0.862	0.830	0.523	0.980	0.993	0.982	0.970	0.981	0.940
高浜	0.940	0.899	0.748	0.966	0.993	0.980	0.973	0.989	0.967
宇治川三川	0.945	0.897	0.729	0.976	0.993	0.982	0.994	0.991	0.976
淀	0.974	0.910	0.781	0.969	0.992	0.980	0.928	0.991	0.978
向島	0.979	0.921	0.808	0.895	0.975	0.943	0.367	0.984	0.954
八幡	0.832	0.878	0.712	0.977	0.987	0.966	0.987	0.982	0.958
飯岡	0.810	0.935	0.848	0.991	0.995	0.990	0.965	0.994	0.989
納所	0.876	0.664	0.299	0.951	0.982	0.962	0.985	0.972	0.942
羽束師	データ無し			0.983	0.984	0.969	0.983	0.989	0.970
平均	0.902	0.867	0.681	0.965	0.988	0.973	0.906	0.986	0.964

Nash値 ; 0.8以上

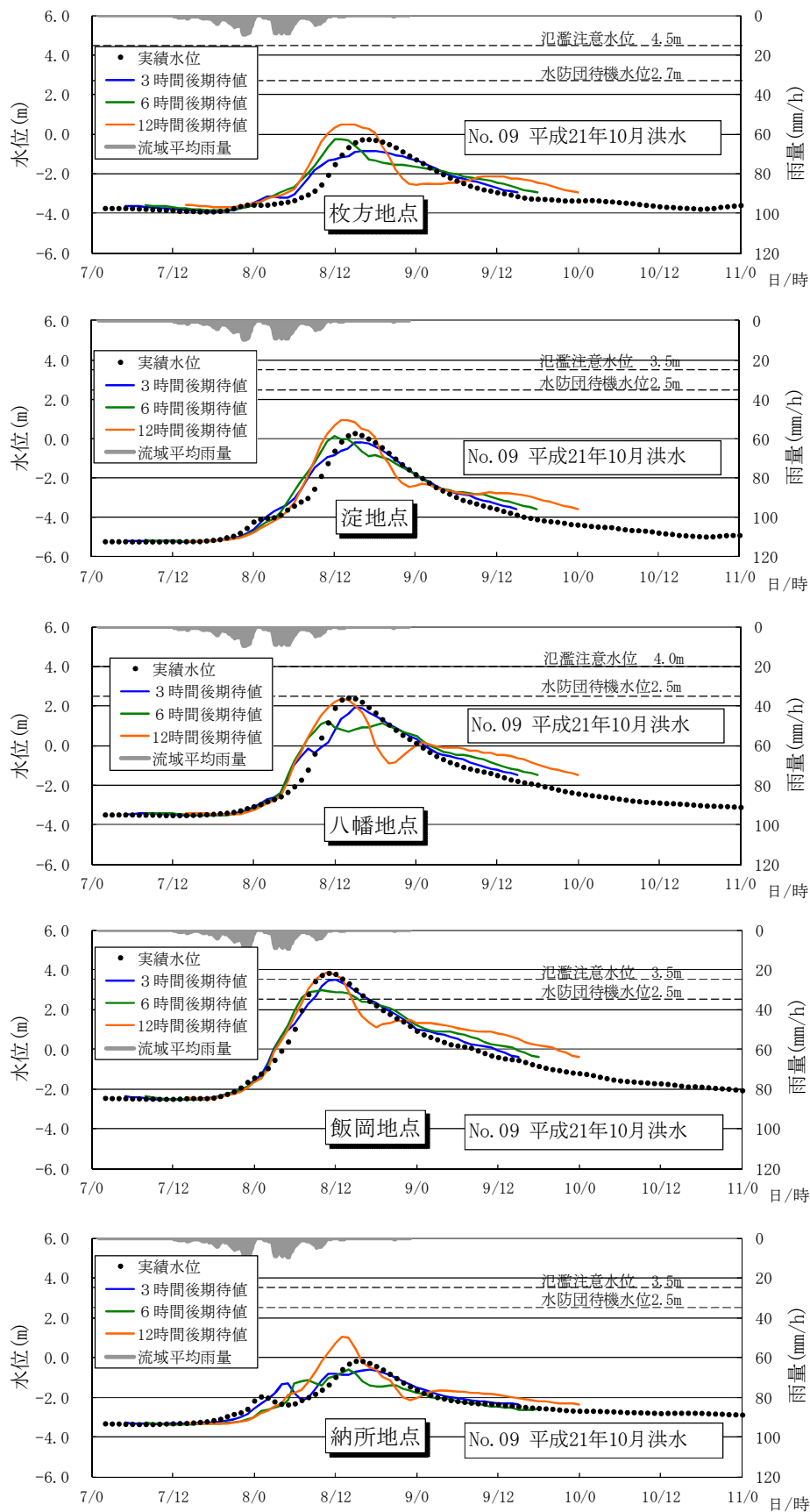


図 8.5.2 現時刻水位からの予測水位の変化(成 21 年 10 月 8 日洪水)

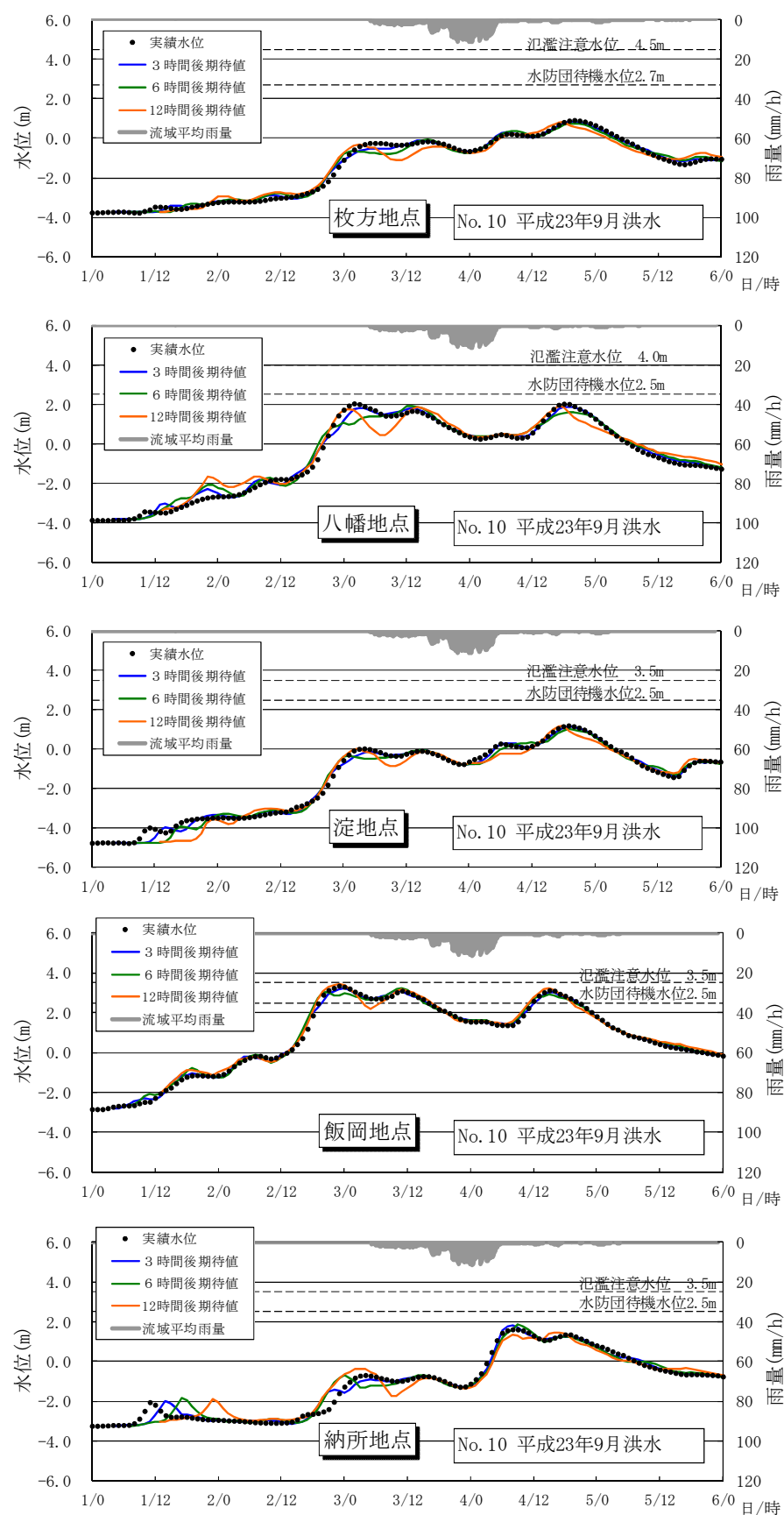


図 8.5.3 現時刻水位からの予測水位の変化(平成 23 年 9 月 2 日～5 日洪水)

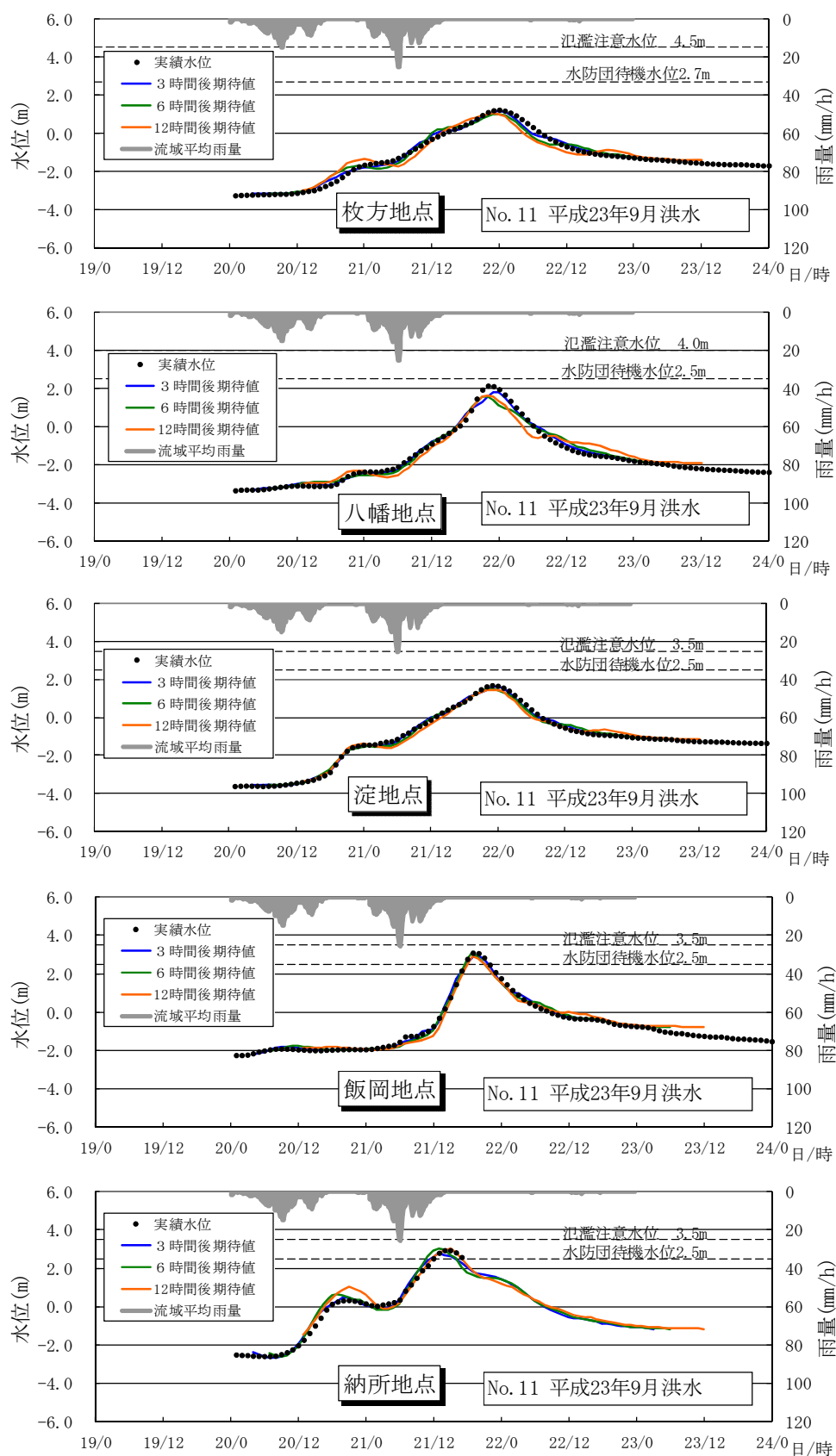


図 8.5.4 現時刻水位からの予測水位の変化(平成 23 年 9 月 20 日～23 日洪水)

8.6 おわりに

本章では、非線形フィルタリング手法のうち最近注目されている **Particle Filter** を淀川水系における三川合流部前後の複雑な流況に対して適用した結果を示した。本章で得られた成果は、以下の通りである。

- ・分布型流出予測モデルによる上流域の流出量を境界条件とした淀川三川合流区間の水位予測システムに、下流部の背水区間、流出特性の違いによる水位の予測として不定流モデルを適用した。その結果、支配方程式（システム方程式）中の多くのパラメータを対象にしたフィルタでは時間を要するため、実用的な観点から時間的制約がある場合は、流量の補正係数による状態量の適用が有効であることを示した。
- ・粒子フィルタ法による現時刻の水位に対するデータ同化の適合性は、非常に高いことがわかった。これは、水位に合わせるように状態量が変化したためである。この妥当性として、現時刻の状態量を初期状態として予測計算した結果、その適合性は非常に良好であった。
- ・予測結果を評価する定量的な指標で比較し、概ね **30cm** 程度の誤差に入っていることから、今後の防災活動、水防活動に資する情報提供が期待できるものと考えられる。
- ・**Particle Filter** による予測計算においては、粒子の確率密度から期待値を算出することができる。そのため、今後の水位予測の表示や提供に際し、基準水位の超過確率等を表示することにより、避難判断・行動や水防活動などに有効に機能する情報提供内容になるものと期待できる。

参考文献

- 1) 田中耕司, 杉浦正之: 歴史的風致地区の浸水被害軽減を支援する洪水予測システムの精度向上, 歴史都市防災論文集 Vol. 6, 2012.7
- 2) 田中丸治哉: 遺伝的アルゴリズムによるタンクモデル定数の同定, 京都大学防災研究所年報 Vol.36-B, pp.231-239, 1993.4
- 3) 立川康人, 佐山敬洋, 寶馨, 松浦秀起, 山崎友也・山路昭彦・道広有里: 広域分布型物理水文モデルを用いた実時間流出予測システムの開発と淀川流域への適用, 自然災害科学 26-2, pp.289-201, 2007.
- 4) 例えば, 片山徹: 非線形カルマンフィルタ, 朝倉書店, 2011.11
- 5) 北川源四郎: モンテカルロ・フィルタおよび平滑化について, 統計数理, Vol.44/ No.3, pp.31-48, 1996.
- 6) 立川康人, 須藤純一, 椎葉充晴, 萬和明, キムスンミン: Particle Filter を用いた河川水位の実時間予測手法の開発, 水工学論文集, Vol.55, pp.S511-S516, 2011.2.
- 7) Montanari, M., Hostache, R., Matgen, P., Schumann, G., Pfister, L. and Hoffmann, L. : Calibration and sequential updating of a coupled hydrologic model using remote sensing-derived water stage, Hydrological Earth Science, 13, pp.367-380, 2009.
- 8) Matgen, P., Montanari, M., Hostache, R., Pfister, L., Hoffmann, L., Plaza, D., Pauwels, V.R.N., De Lannoy, G.J.M., De Keyser, R. and Savenije, H.H.G. : Towards the sequential assimilation of SAR-derived water stage into hydraulic models using the particle filter: Proof of concept, Hydrological Earth Science, 14, pp.1773-1785, 2010.
- 9) Giustarini, L., Matgen, P., Hostache, R., Montanari, M., Plaza, D., Pauwels, V.R.N., De Lannoy, G.J.M., De Keyser, R., Pfister, L., Hoffmann, L., and Savenije, H.H.G. : Assimilating SAR-derived water level data into a hydraulic models: a case study, Hydrological Earth Science, 15, pp.2349-2365, 2011.
- 10) 猪股広典, 深見和彦: 吉野川流域広域水危険度判断支援システムの開発, 河川技術論文集, Vol.13, pp.433-438, 2007.6.

第9章 防災体制支援を目的とした九頭竜川流域のリアルタイム洪水氾濫予測システムの開発

9.1 はじめに

近年，ゲリラ豪雨や計画規模を超過した降雨等による浸水被害が発生している．これらの洪水にも対応できるように，Xバンドレーダの活用や分布型洪水予測システムの導入による洪水予測機能の高度化が図られている¹⁾．また，国土交通省では，全国的にリアルタイム氾濫予測システム構築²⁾³⁾が推進され，浸水被害対策への対応が進んでいる．

一方，現状の河川整備は概ね30年確率に耐えうる洪水を安全に流せるように，ダムや河川改修が行われているが，整備規模を超える洪水をハード対策で防ぐことは現実的に不可能である．また，ハード対策は効果を発揮するまでに時間を要するため，施設が完成するまでには，浸水被害等が発生する可能性も考えられる．そのため，洪水による浸水被害は発生することを前提に，地域と行政が一体となって，人民の命を守る取り組みや，浸水被害を軽減する取り組み，避難計画の立案も各地で進められ始めている．しかし，これらの減災対策を実施する際の課題としては，実際の氾濫現象を基づく避難経路の検索や避難判断・行動を執ることは，まだ十分な情報提供がなされているとは言い難い状況である．

氾濫予測システムに係わる研究は，堤内地の氾濫現象を数値的にシミュレートするためのモデルの精度向上を目的にした研究²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾や，先の氾濫解析モデルを踏まえた氾濫予測システムといった実用的な観点からアプローチを試みた研究⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾がある．さらに，氾濫現象のシミュレート結果から，避難判断や行動に着目した研究¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾¹³⁾が行われている．その研究事例は非常に多く，本章課題がこれらの基礎的な検討の積み重ねの上に成り立つ応用的な研究として位置づけられる．

その一方で，河川管理者が実際に運用するシステムは，防災体制や氾濫解析データの利用方法などを考慮されたものとしなければならない．さらには，従来の洪水氾濫予測

モデルは、外水氾濫が主体であった。しかし、内水氾濫と外水氾濫を同時に追跡できる統合モデルでの氾濫を予測することにより、実際の洪水氾濫では、大河川からの越水・破堤氾濫が生じる前に、下水道の排水不良や中小河川からの浸水被害が発生している場合が多いと想定される。このような現象の予測に基づく、河川管理者への防災業務の支援を、リアルタイムで行うことができるシステムに関する研究は行われてこなかった。

本章では、内外水氾濫解析モデルの統合化、洪水中的破堤等にも追従できるシステムの運用方法や、氾濫特性の把握や災害時における避難行動支援のために解析結果の利用方法を踏まえたシステムの内部処理、外部処理の設計・開発を目的した。

9.2 洪水氾濫予測システムの開発方針

9.2.1 洪水氾濫予測システムの開発における基本方針

今回構築するシステムの目的は、流域に対する浸水状況を予測し、行政の防災業務支援や住民の迅速な避難誘導への活用、災害復旧支援等に活用できる情報を提供することである。したがって、以下のような方針でこのシステムの開発するものとした。

- ①リアルタイムでの迅速かつ精度のよいモデル用いた予測システム
- ②操作性に配慮したユーザインターフェース
- ③誰でもが閲覧可能となる **WEB** ブラウザによるシステム構築

9.2.2 水防・防災体制と本システムの関連性

気象庁と河川管理者（国土交通省または都道府県）は、河川の水位や降雨状況等を情報交換・共有し、洪水の発生の恐れや氾濫の危険性を市町村や住民に周知する必要性があると判断した後に、洪水注意報や洪水警報を共同で発令することとなっている。

洪水予報業務支援として、洪水予報指定河川においては、水位予測地点の河道水位を予測する洪水予測システムが運用されている。しかしながら、このシステムでは、河川氾濫を予想することは困難であるものの、予測水位から破堤の位置を想定した上で、被害の発生時刻や浸水深等の水理量の程度などを行政側で把握し、関係機関や住民に情報提供していくことが、防災体制を執る上で重要な業務として位置づけられている。

本システムは、氾濫の危険性が高まった場合に、氾濫現象の予測結果を確認することができ、浸水の恐れが高い地域や施設など、きめ細やかな情報提供を行っていくための業務支援が可能なシステムである。

一方で、国土交通省近畿地方整備局福井河川国道事務所では、「九頭竜川・北川水系水防マネジメント計画書～風水害対策編～」¹⁴⁾を作成し、堤防決壊の被災が発生した場合の基本シナリオをもとに、水防業務のワーク・フローと災害対策部運営計画書の項目をとりまとめている。この基本シナリオを表 9.2.1 に示す。これによれば、水系内の水位観測所の基準水位、気象情報に応じて体制判断基準が設定されており、河川管理者の災害対策本部の行動や外部向けの情報発信、一般住民向けの情報発信のタイミングが規定されている。さ

らに、この基本フローに対して、対策本部は、組織を班・係に分け、それぞれに役割がシナリオに対して設定されており、設計開発するシステムでの支援内容が抽出される。その結果を表 9.2.2 に示す。これによれば、早い段階での内水氾濫と流下能力の少ない地点の破堤の可能性から浸水地区・施設を逐次予測をすると同時に、道路冠水の予測・実態から破堤に備えた災害復旧のための輸送路を把握することが必要なる。さらに、これらの情報は、体制に応じて地方自治体の通知やマスコミへの発表を行っていくこととなっている。河川管理者は、そのための情報を一元化し、洪水予測結果から想定される浸水範囲やその影響を予測する必要がある。

表 9.2.1 九頭竜川水系の水防体制の行動・報告・通知の流れ¹⁴⁾

体制判断基準			事務所体制	行動・報告・通知			
水位	気象	事象		内部把握 (本部・係務所内向け)	発動時刻	外部発信レベル1 (行政・水防団向け)	外部発信レベル2 (一般住民向け)
降雨により水位が上昇				気象情報通知(情報)			
指定水位(水防団待機水位)に達すると予測	大雨、洪水及び高潮に関する注意報が発令され、対策部長が必要と認められるとき	竜巻大被害地対策班長が速報を発令したとき(竜巻大被害の流入量が500m ³ /sに達する確率が時間経過で、確率が増えるとき)	注意体制	防災体制通知			
指定水位(水防団待機水位)超過	台風の本体が上陸し、対策部長が必要と認められるとき	水門、閘門、樋門、堰等の操作体制を必要とするとき		高水波の準備			
警戒水位(はん注意警戒水位)に達すると予測	流域平均高加雨量が50mmに達したとき	その他、対策部長の判断、対策本部長の指示による		出水観測(第1報) (水防団待機水位に達したとき)			
警戒水位(はん注意警戒水位)に達すると予測	大雨、洪水及び高潮に関する注意報が発令され、対策部長が必要と認められるとき	竜巻大被害の流入量が500m ³ /sを超え、観測作を開始	第一警戒体制	防災体制通知		水防警戒(待機)発令 (水防団待機水位を超え、はん注意警戒水位を超える3時間前)	
警戒水位(はん注意警戒水位)超過	台風の近畿地方接近又は上陸が予測される時	水門、閘門、樋門、堰等の操作の必要があるとき		河川監視点検実施 (水防団待機水位を超え、さらに上昇し、はん注意警戒水位に達するおそれがあるときから点検を開始し、洪水が最高水位に達した後、減水し水防団待機水位に達するまで)		水防警戒(準備)発令 (はん注意警戒水位を超える2時間前)	
警戒水位(はん注意警戒水位)超過	流域平均高加雨量が100mmになったとき	水防活動の必要が予測される時		出水観測 (はん注意警戒水位を超え、はん注意警戒水位を下回るまで、毎3時間報告を行う)		水防警戒(出動)発令 (はん注意警戒水位を超える1時間前)	
警戒水位(はん注意警戒水位)よりさらに上昇すると予測	流域平均高加雨量が200mmになったとき	豪雨警報に係る交通規制が予測される時	第二警戒体制	防災体制通知		ホットライン※ (はん注意警戒水位に達するおそれがあるとき)	はん注意警戒情報(洪水注意情報) (はん注意警戒水位に達し、さらに水位の上昇が見込まれるとき)
危険水位(はん注意警戒水位)超過、または計画高水水位超過	最大な被害が発生したとき	その他、対策部長の判断、対策本部長の指示による		水位予測(特定区域) (はん注意警戒水位を超える3時間前から毎3時間)			はん注意警戒情報(洪水警戒情報) (一定時間後に、はん注意警戒水位に到達することが見込まれるとき)
危険水位(はん注意警戒水位)超過、または計画高水水位超過	最大な被害が発生したとき	その他、対策部長の判断、対策本部長の指示による	非常体制	防災体制通知		ホットライン※ (はん注意警戒水位または計画高水水位を超えたとき)	はん注意警戒情報(洪水警戒情報) (はん注意警戒水位に達したとき)
危険水位(はん注意警戒水位)超過、または計画高水水位超過	危険対策や緊急復旧が完了したとき		第二警戒体制	防災体制通知			はん注意警戒情報(洪水警戒情報)切替 (はん注意警戒水位を下回ったとき)
警戒水位(はん注意警戒水位)を下回る	水防活動が終了したとき		第一警戒体制	防災体制通知		水防警戒(解除)発令 (はん注意警戒水位以下になり水防作業を必要となくなるとき)	はん注意警戒情報(洪水警戒情報)解除 (はん注意警戒水位を下回ったとき)
指定水位(水防団待機水位)を下回る	竜巻大被害、水門、閘門、樋門、堰等の操作体制を解除したとき		注意体制	防災体制通知			
出水による危険がなくなった	大雨、洪水及び高潮に関する注意報の解除		体制解除	防災体制通知			
出水終了後				災害レポート			

表 9.2.2 九頭竜川水系の災害対策本部の班・係の情報収集・判断とシステム機能の内容

班	係	注意体制	第一警戒体制	第二警戒体制	非常体制	非常体制(はん濫発生)
対策部		●記者発表資料の作成 ・予測浸水域の状況(浸水深、流向・流速、危険度、到達時間)を把握 ・浸水が予測される地区・施設の把握				
計画班	計画係	●はん濫予測の整理 ・予測浸水域の状況(浸水深、流向・流速、危険度、到達時間)を把握 ・浸水が予測される地区・施設の把握	●本部及び防災関係機関との経絡的な調整 ・最適ルートの把握 ・道路冠水状況の把握	●はん濫流に関する情報 ・越水、決壊危険箇所を地図上で確認 ・越水、決壊が発生した場合のはん濫流の挙動の把握 ・内水はん濫による浸水が予測される場所や地区の把握	●決壊が予想されることに関し、局と洪水予報(洪水情報)の発表を調整 ・越水、決壊危険箇所を地図上で確認 ●避難勧告等を促す本部情報を沿川、はん濫域の市町村に対して発表 ・浸水が予測される地区・施設の把握 ●緊急決壊情報、避難指示を促す本部情報を沿川、はん濫域の市町村に発表 ・浸水が予測される地区・施設の把握 ●資材搬入路の確保 ・最適輸送の把握 ・道路冠水状況の把握 ●はん濫流の挙動把握 ・越水、決壊が発生した場合のはん濫流・内水はん濫の挙動	
対策班	対策係	●被害状況の把握・整理 ・予測浸水域の状況(浸水深、流向・流速、危険度、到達時間)を把握 ・浸水が予測される地区・施設の把握				
	工務係					●応急復旧対策の企画・立案又はその準備 ・最適輸送の把握 ・道路冠水状況の把握 ●緊急復旧計画の立案 ・最適ルートの把握
管理班	操作係	●災害復旧等の建設機械等の配備計画の立案・実施 ・最適ルートの把握 ・道路冠水状況の把握				
	管理係	●対策部・現地対策班との被害状況の連絡 ・予測浸水域の状況(浸水深、流向・流速、危険度、到達時間)を把握 ・浸水が予測される地区・施設の把握				

9.2.3 洪水氾濫予測モデルの適用

今回のシステムでは、内水氾濫も含めて、市街部の複雑な街区や道路網を表現できるモデル構築が必要である。

これまでの浸水想定区域図や治水経済調査等で用いられる氾濫モデルは、一般に直交座標系（デカルト座標系）によるメッシュ分割により作成されている。直交座標系で、市街地における複雑な街区や道路網を流下する氾濫現象を表現するためには、メッシュを非常に詳細に分割する必要があるが、メッシュサイズが細くなると計算時間が膨大となる。ここで、リアルタイムでの演算のためには、計算時間にも留意する必要がある。そのために、本システムにおいては、地形形状に応じて、メッシュ分割やサイズを変更できる非構造格子モデル¹⁵⁾を用いた。

上記の氾濫モデルに加えて、上流からの流出量を予測するモデル（洪水予測モデル）、内水氾濫モデルを組み合わせたモデルとすることで、洪水氾濫予測モデルを構築する。

9.2.4 避難行動の支援

浸水被害が発生するような場合には、流域内の地方自治体は、住民の安全かつ迅速な避難誘導が重要となる。そのため、自宅や職場の浸水状況、避難先の浸水状況、安全な避難ルートといった情報が必要である。これらの情報を把握するために、以下の支援機能を構築することとした。

- ①洪水予警報のための浸水予測の表示機能
- ②避難準備情報や避難勧告の発令氾濫のための浸水予測の表示機能
- ③避難ルートや災害復旧等の防災支援のための道路検索機能

9.3 洪水氾濫予測モデルの構築

9.3.1 対象流域の概要¹⁶⁾

九頭竜川は、図 9.3.1 に示すように、その源を福井県と岐阜県の県境の油坂峠(標高 717m)に発し、石徹白川、打波川等の支川を合わせ、大野盆地に入り真名川等の支川を合わせ、福井平野（越前平野）に出て福井市街地を貫流し日野川と合流、その後は流れを北に変え日本海に注ぐ、幹川流路延長 116km、流域面積 2,930km² の一級河川である。

その流域は、福井、岐阜の両県にまたがり、福井市をはじめ 8 市 4 町からなり、流域の土地利用は山地等が約 81%、水田や畑地等の農地が約 13%、宅地等の市街地が約 6%となっている。流域内には福井県の県庁所在地であり流域内人口の約 4 割が集中する福井市があり、沿川には、北陸自動車道、JR 北陸本線、国道 8 号、157 号、158 号等の基幹交通施設がある。

また、図 9.3.2 に示すように福井市周辺の平野部は、九頭竜川、日野川、足羽川などの洪水時の河川水位より低い位置にあり、氾濫時には甚大な被害が予想されている。こ

の被害想定は、九頭竜川水系工事実施基本計画（昭和54年4月策定）で定めた基本高水流量（2日雨量の超過確率150年）に対して平成14年当時の洪水調節施設での流量低減を考慮した氾濫解析結果を基に、平成14年4月に浸水想定区域図が公表されている。なお、平成18年6月には、河川法の改正に伴い九頭竜川水系河川整備計画基本方針が策定され、現在はこの計画に従い、河川整備が実施されている。

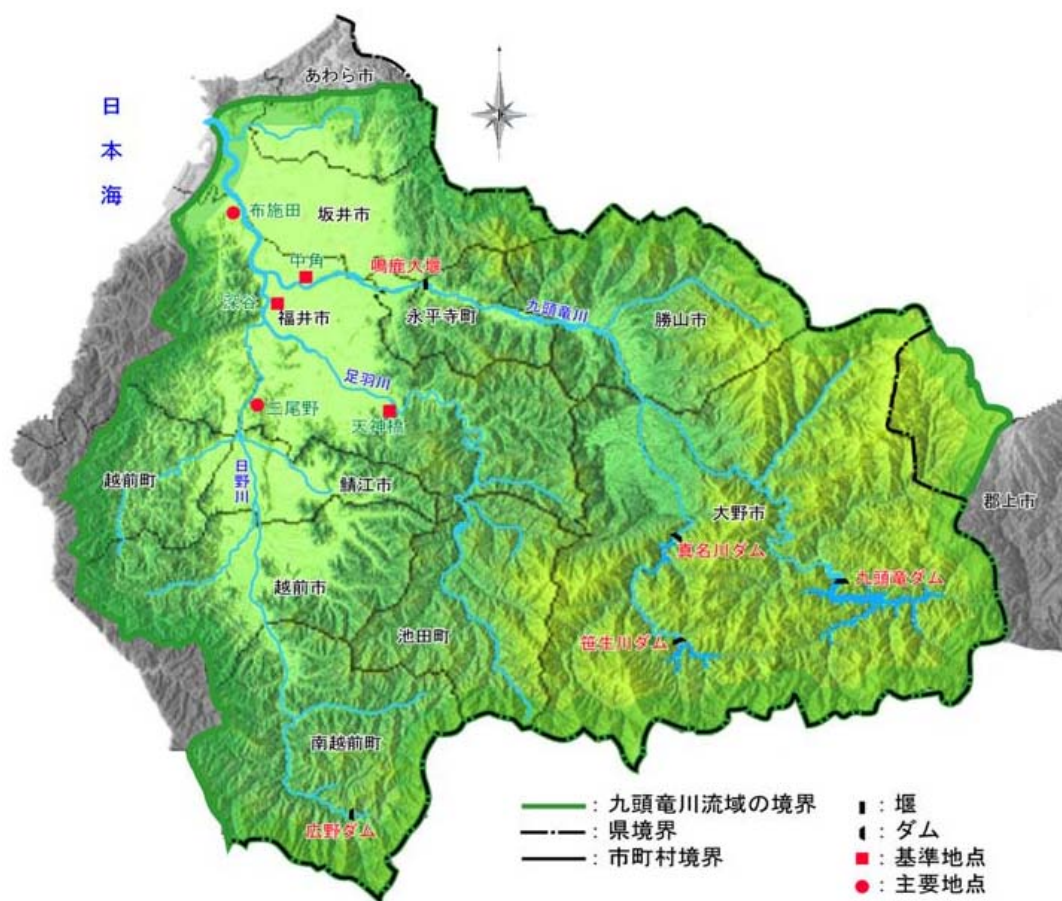


図 9.3.1 九頭竜河流域の概要¹⁶⁾

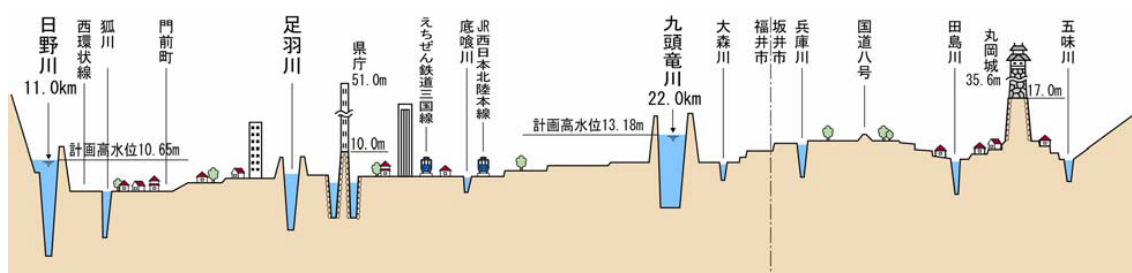


図 9.3.2 福井平野の地盤高と河川水位の比較¹⁶⁾

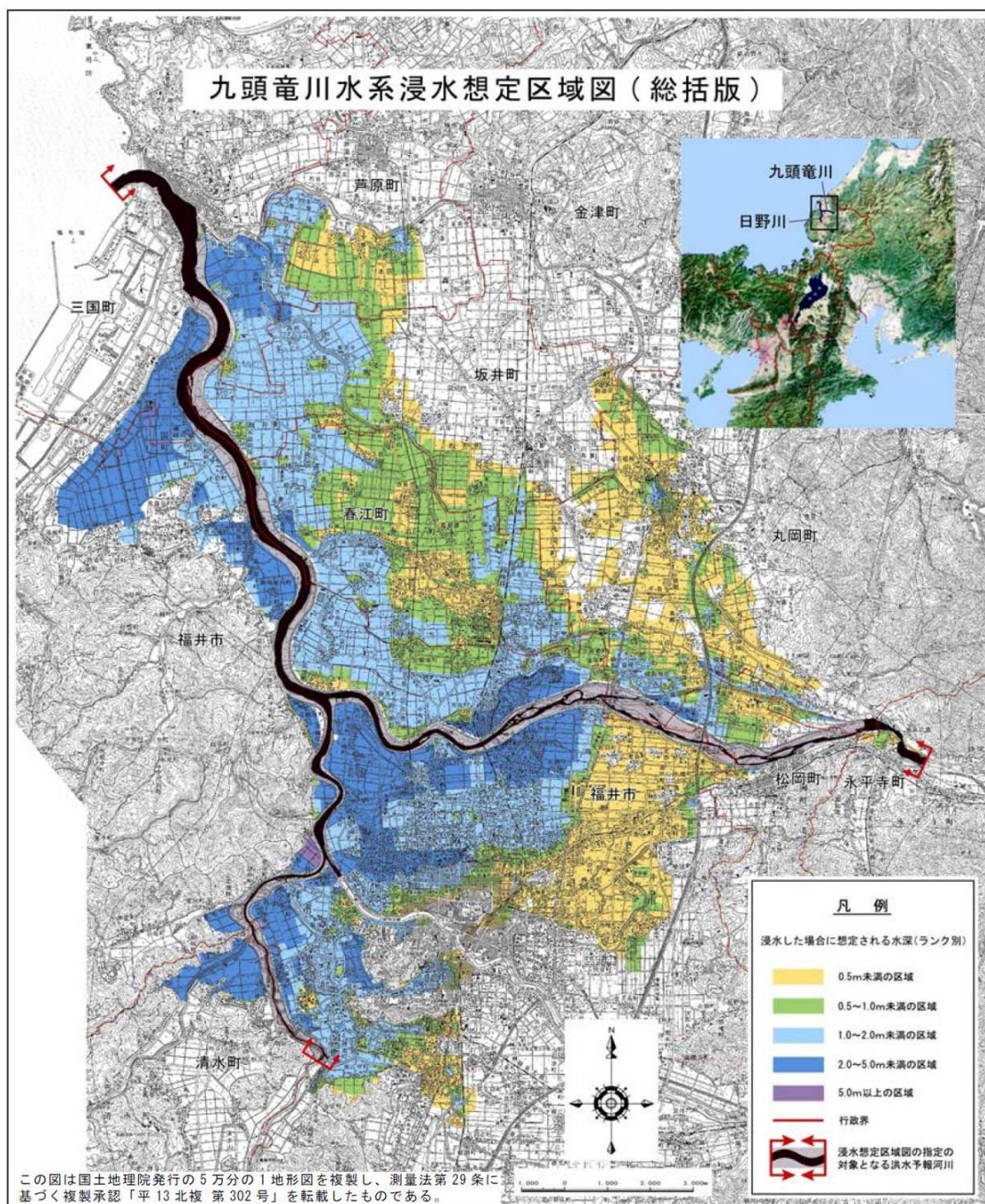


図 9.3.3 九頭竜川水系浸水想定区域図（総括図）¹⁷⁾

表 9.3.1 治水計画の内容（九頭竜川水系工事実施基本計画第2回改訂以後）¹⁷⁾

治水計画	工事・工期	着手の契機	計画高水流量 (基本高水流量)	
九頭竜川水系工事 実施基本計画 (第2回改訂) ※本計画は、昭和41 年に策定されたが、 昭和40年奥越豪雨 により昭和43年6 月に第1回改訂が行 われた。	昭和54年6月	昭和47年9月台風20 号出水，昭和50年8 月台風6号出水	布施田 中角 深谷 三尾野 前波	9,200 (12,500) 5,500 (8,600) 4,800 (5,400) 3,300 (3,300) 1,800 (2,600)
九頭竜川水系河川 整備計画基本方針	平成18年2月		中角 深谷 前波	5,500 (8,600) 4,800 (5,400) 1,800 (2,600)

9.3.2 洪水氾濫予測モデルの構成

九頭竜川における洪水氾濫予測モデルは、9.2.3 で概説したが、具体的には、以下のようなモデルの構成となっている。図9.3.4に示すように、まず九頭竜川水系内の実績雨量と予測雨量から洪水予測モデルによって、直轄上流端での流出量を算出する。さらに、堤内地の内水氾濫の予測をするために、堤内地内の雨量から内水域の流出量を算定し、内水河川の水理解析モデルから水位を算定する。この際に、九頭竜川・日野川および足羽川への排水を考慮するために内水ポンプ場の排水能力と操作規則を考慮した内水排除モデルを組み合わせている。一方で、上記の支川からの排水量と洪水予測モデルの算定結果から、三河川の河道内の水位を

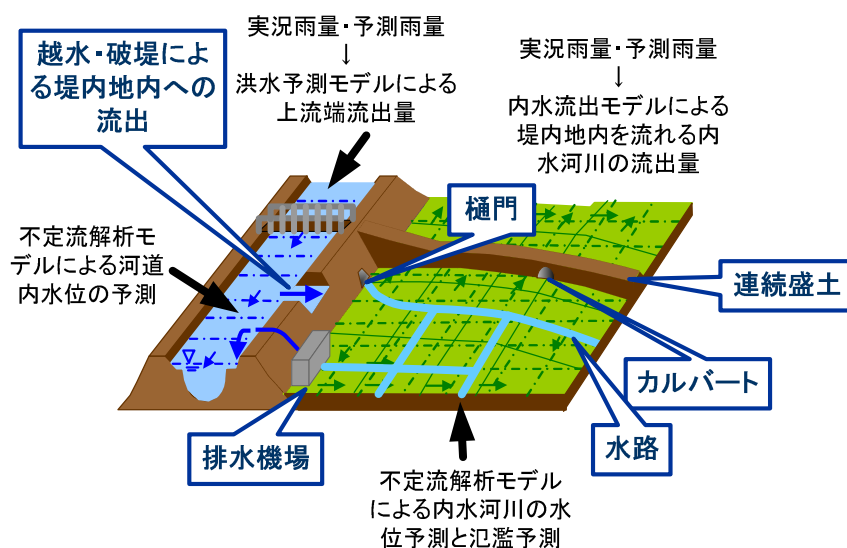


図 9.3.4 モデルの構成¹⁸⁾

予測するものである。

三河川には、河道断面の存在する地点毎に破堤開始水位が設定されており、これを破堤の閾値としてシステム側で破堤の可能性を自動的に判定している。また、この閾値は今後の河川整備による引き上げも対応できるように、システム側で変更できるようにしている。

9.3.3 洪水予測モデルの概要

九頭竜川水系の洪水予測システムは、平成9年に作成され、その後平成14年度、平成21年度に改良が加えられてものである。さらに、平成22年度¹⁹⁾には、予測モデルの構成の変更はないものの、適用している貯留関数モデルの定数の見直し、フィードバック手法の変更、10分間隔での予測計算の実行機能が追加され、予測結果の精度向上が図られている。

氾濫予測システムにおいては、この別途開発されている洪水予測システムから過去の水位流量データと6時間先の予測結果を取得するのとした。

9.3.4 河道モデルの概要

(1) 対象河川

氾濫予測モデルで対象とする河道は、九頭竜川、日野川の国管理区間と、県管理区間である足羽川も含めたものとした。なお、足羽川については足羽川堰堤よりも下流区間を対象とした。この理由は、資産集積地である福井市内と直轄河川沿いの市町への氾濫予測を行うことを目的していることにある。

また、内水氾濫も対象とするため、以下に示す11河川を、別途内水モデルとして組み込むこととした。

図9.3.5には、九頭竜川本川他の対象とした河川の区間と位置を示す。

- ・九頭竜川筋：兵庫川，磯部川，八ヶ川，馬渡川，芳野川
- ・日野川筋：底喰川，狐川，江端川，志津川，未更毛川
- ・足羽川筋：荒川

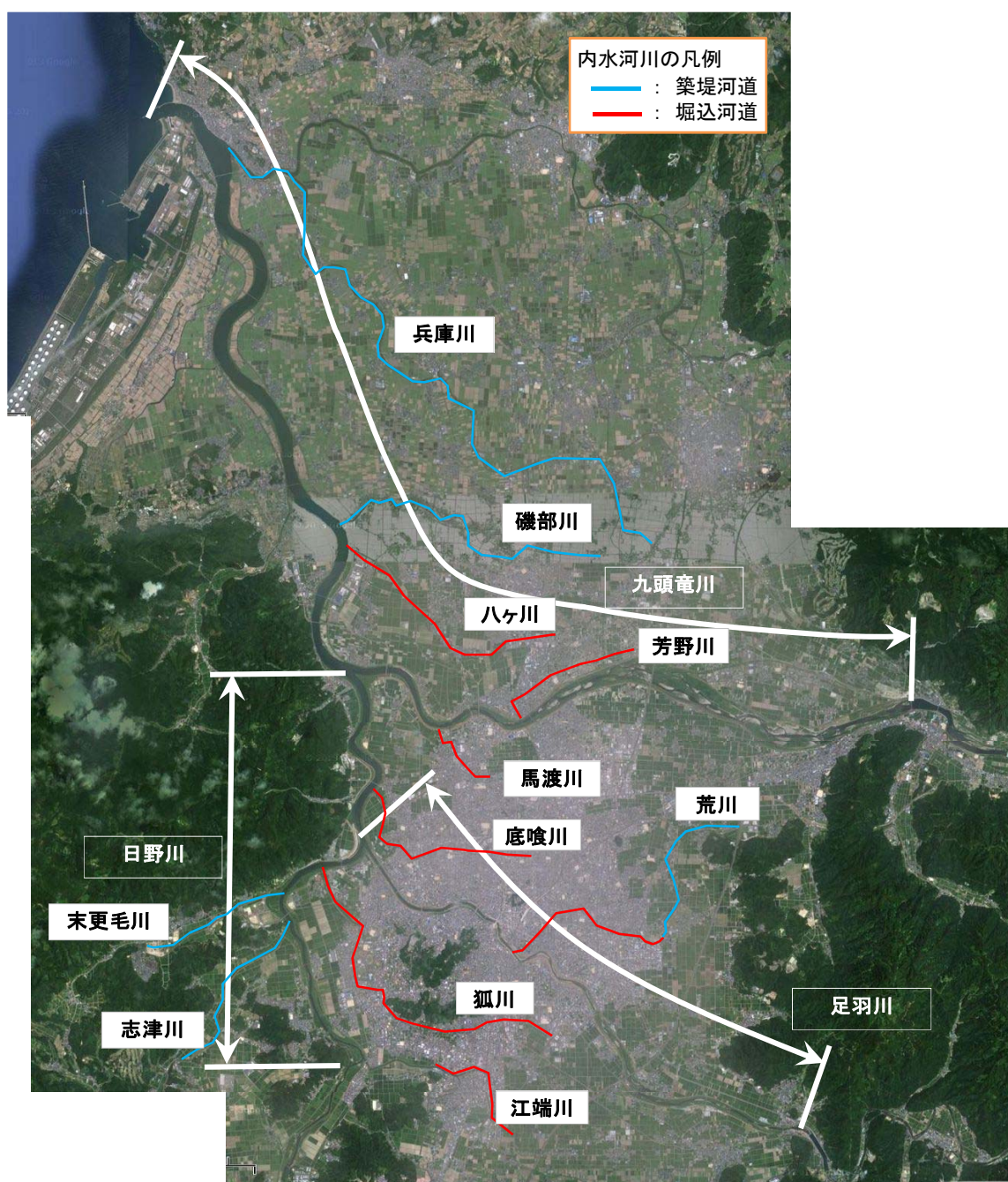


図 9.3.5 河道モデルとしてモデル化する河道区間（Google Map より）

(2) 河道モデルの概要

河道内の水位予測モデルは、一次元不定流解析モデル²⁰⁾を適用した。支配方程式は、連続式と運動方程式であり、以下の通りである。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} = s_0 - s_f \quad (2)$$

ここに、 A は流水断面積、 Q は流量、 q は x 方向の単位長さあたりの横流入流量（流入を正）、 $v=Q/A$ は断面平均流速、 $s_0=\sin\theta$ は水路底勾配で、基準面から河床までの高さを z とすれば、 $\sin\theta=-dz/dx$ 、 s_f は摩擦勾配で、抵抗則として Manning 公式を用いるとき、 $s_f=n^2v/|v|R^{4/3}$ (n は Manning の粗度係数、 R は径深)、 h は水深、 g は重力加速度である。

上式(1)および式(2)を特性曲線による表示に改め、図 9.3.6 を参照して、以下のよう

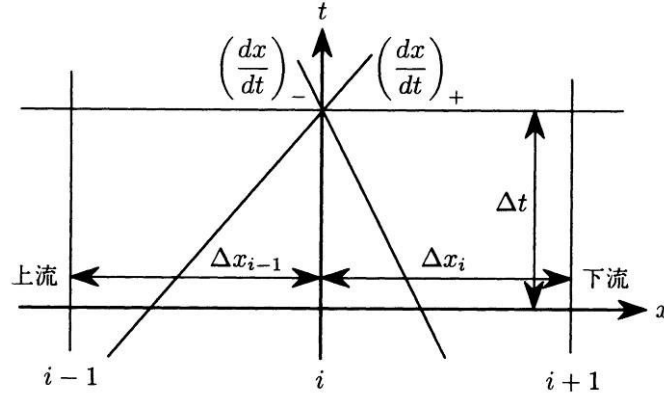


図 9.3.6 特性曲線法

正の特性曲線 $(dx/dt)_+=v+c$ について、断面 $i-1$ と i との間で成立する差分式は、以下の通りである。

$$\left(\frac{1}{B_s} \right)_i \left(\frac{A_i^{n+1} - A_i^n}{\Delta t} + \frac{Q_i^n - Q_{i-1}^n}{\Delta x_{i-1}} - q_{i-q}^n \right) + c_i^n \left(\frac{1}{g} \frac{v_i^{n+1} - v_i^n}{\Delta t} + \frac{H_{ti}^n - H_{ti-1}^n}{\Delta x_{i-1}} + \frac{s_{fi-1}^n + s_{fi}^n}{2} \right) = 0 \quad (3)$$

また、負の特性曲線 $(dx/dt)_-=v-c$ について、断面 i と $i+1$ との間で成立する差分式は、である。

$$\left(\frac{1}{B_s} \right)_i \left(\frac{A_i^{n+1} - A_i^n}{\Delta t} + \frac{Q_{i+1}^n - Q_i^n}{\Delta x_i} - q_i^n \right) - c_i^n \left(\frac{1}{g} \frac{v_i^{n+1} - v_i^n}{\Delta t} + \frac{H_{ti+1}^n - H_{ti}^n}{\Delta x_i} + \frac{s_{fi}^n + s_{fi+1}^n}{2} \right) = 0 \quad (4)$$

ここに、 Δx_i は断面 i と $i+1$ の区間距離、 $B_s = (\partial A / \partial h)_{x:const}$ は水面幅、 $c = \sqrt{ga / B_s}$ は波速、

$H_t = v^2 / (2g) + h + z$ は全エネルギー水頭である。

9.3.5 外水氾濫モデルの概要

(1) 外水氾濫モデルの概要

外水氾濫解析は、川池の研究²¹⁾で用いられている非構造格子上で離散化された平面二次元氾濫解析モデルを用いた。以下に支配方程式を示す。

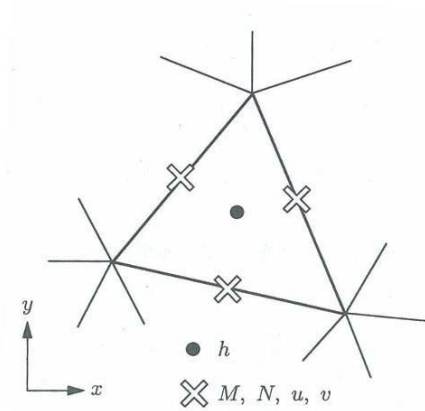
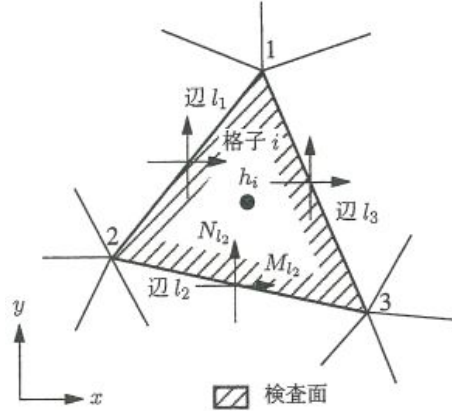
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = q \quad (5)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 M \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (6)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{gn^2 N \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (7)$$

ここに、 h は水深、 H は水位、 u 、 v はそれぞれ x 、 y 方向の流速、 M 、 N はそれぞれ x 、 y 方向の流量フラックス、 n は粗度係数、 g は重力加速度を表す。

これらの未知量は、図9.3.7および図9.3.8示す位置で定義する。すなわち、全領域に対してまずデカルト座標軸（ x 軸、 y 軸）を設定し、この座標系における各方向の流速（ u 、 v ）、流量フラックス（ M 、 N ）は格子境界（多角形の辺の中点）で定義し、水深（ h ）は格子の図心（多角形の重心を用いる）で定義する。計算はLeap-Frog法を用いて陽的に進める。


 図 9.3.7 未知量の定義位置²¹⁾

 図 9.3.8 連続式の検査面²¹⁾

まず、連続式について、その差分式は以下のものを用いる。なお、このときのコントロールボリュームは、図9.3.8に示す領域を用いる。

$$\frac{h^{n+3} - h^{n+1}}{2\Delta t} + \frac{1}{A} \sum_{l=1}^m \{M_l^{n+2}(\Delta y)_l - N_l^{n+2}(\Delta x)_l\} = 0 \quad (8)$$

ここに、 h は格子の水深、 m は格子を囲む辺の数、 A はコントロールボリューム、すなわち格子の面積である。 M_l 、 N_l はそれぞれ辺 l 上での x 、 y 方向の流量フラックスを表

し, $(\Delta x)_l$, $(\Delta y)_l$ は辺 l での両端の点の x 座標, y 座標の差を表す. なお, 上付き添字は時間ステップである.

運動量式について, 図 9.3.9 に示す格子 i , j にはさまれた格子辺 L での計算には以下のような差分式を用いる.

$$\frac{M^{n+2} - M^n}{2\Delta t} + M1 + M2 = -g\tilde{h}^{n+1}(\nabla H)_x - \frac{gn^2 \frac{M_L^{n+2} + M_L^n}{2} \sqrt{(u_L^n)^2 + (v_L^n)^2}}{(\tilde{h}^{n+1})^{4/3}} \quad (9)$$

$$\frac{N^{n+2} - N^n}{2\Delta t} + N1 + N2 = -g\tilde{h}^{n+1}(\nabla H)_y - \frac{gn^2 \frac{N_L^{n+2} + N_L^n}{2} \sqrt{(u_L^n)^2 + (v_L^n)^2}}{(\tilde{h}^{n+1})^{4/3}} \quad (10)$$

ここに, M_L , N_L は格子辺 L 上での x および y 方向の流量フラックス, u_L , v_L は格子辺 L 上での x および y 方向の流速である. $(\nabla H)_x$, $(\nabla H)_y$ はそれぞれ格子 i , j 間の水面勾配 ∇H の x , y 方向成分である. h は格子辺上の水深であり, 図心における水深から補間して求める. $M1$, $M2$ または $N1$, $N2$ は, それぞれ式(9)および式(10)の移流項 (左辺第 2 項, 第 3 項) を表しており, 図 9.3.10 に示すコントロールボリュームを考えて, 以下に示す式(11)及び式(12)で計算を行う.

$$M1 + M2 = \frac{1}{A_{cv}} \sum_{l=1}^m \{ (u_l \tilde{M}_l)(\Delta y)_l - (v_l \tilde{M}_l)(\Delta x)_l \} \quad (11)$$

$$N1 + N2 = \frac{1}{A_{cv}} \sum_{l=1}^m \{ (u_l \tilde{N}_l)(\Delta y)_l - (v_l \tilde{N}_l)(\Delta x)_l \} \quad (12)$$

ここに, A_{cv} はコントロールボリュームの面積, m はコントロールボリュームを囲む辺の数, u_l , v_l は辺 l 上での流速, $(\Delta x)_l$, $(\Delta y)_l$ は辺 l の両端の点の x 座標, y 座標の差である. \tilde{M} , \tilde{N} には上流側の補間流量フラックスを用いることにする.

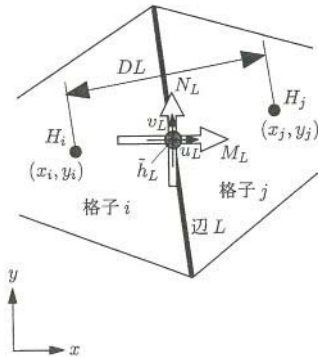


図 9.3.9 運動量式の計算²¹⁾

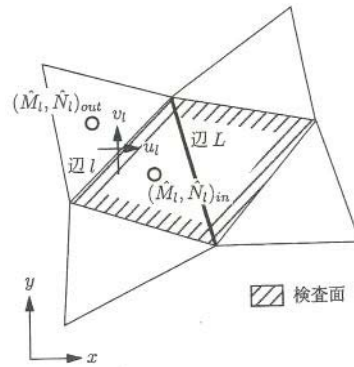


図 9.3.10 移流項の計算²¹⁾

(2) 氾濫原のメッシュ分割

文献 22)を参考に、堤内地の状況や対象とする支川の流入状況等を考慮して対象氾濫原を設定した。基本となるメッシュサイズは 100m メッシュとし、福井市街地部を 50m メッシュに細分割し、さらに主要道路の形状を考慮した非構造格子モデルを構築した。ここに、道路形状を考慮した理由として、氾濫流が道路を川のように流れることや、メッシュで平均化された流速では、堤内地を拡散する現象が表現できない可能性があるためである。道路については、国道・県道および市道の中で幅員 6m 以上のものを考慮した。

図 9.3.11 には、対象氾濫原とそのメッシュで分割したものを示す。

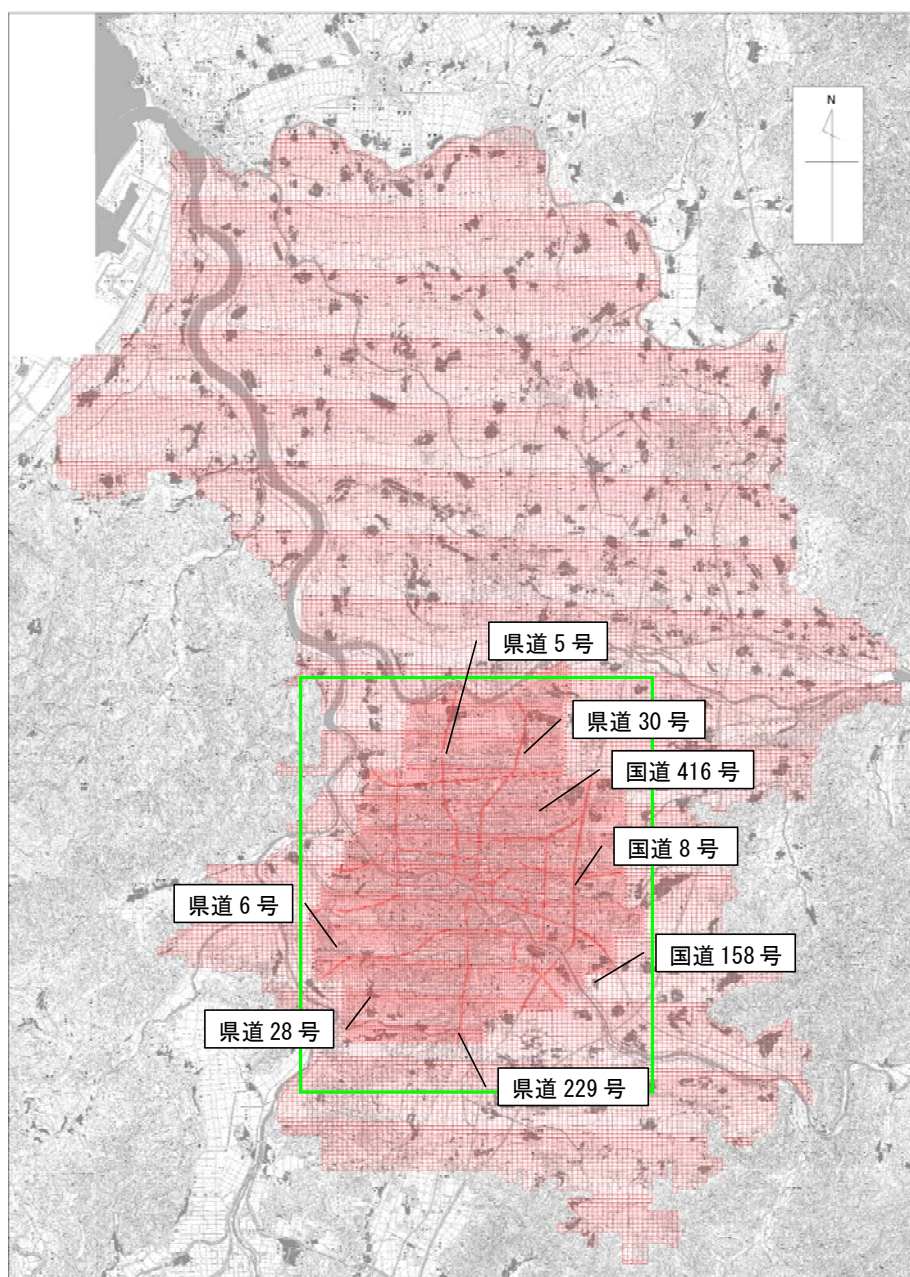


図 9.3.11 メッシュ分割図（道路メッシュ導入・全体図）

(3) メッシュの属性情報の作成

分割された堤内地には、地形の起伏や、田畑・家屋・道路といった土地利用形態が異なり、氾濫流に影響を与えることが考えられる。氾濫解析では、このような氾濫原の情報に基づき、地盤高の設定、粗度係数の設定を行う必要がある。

地盤高については、レーザープロファイラーデータ²²⁾（平成14年度 九頭竜川流域航空レーザー計測業務）を用いて、平均地盤高を設定した。まず、各メッシュ（100m×100m）内にあるレーザープロファイラーデータを平均して100mメッシュ平均地盤高を作成した。さらに、福井市街地における100mメッシュ未満の箇所については、各々のメッシュに応じて平均地盤高を再設定した。設定した地盤高を図9.3.12に示す。

堤内地内のメッシュ毎の粗度係数については、氾濫シミュレーション・マニュアル（案）²³⁾を参照して、以下に示す水深 h と建物占有率 θ との関係式により設定した。

$$n^2 = n_0^2 + 0.020 \frac{\theta}{100 - \theta} h^{4/3} \quad (13)$$

$$n_0^2 = \frac{n_1^2 A_1 + n_2^2 A_2 + n_3^2 A_3}{A_1 + A_2 + A_3} \quad (14)$$

ここに、 n_0 は底面粗度係数、 A は各メッシュの土地利用毎の面積であり、 A_1 は農地、 A_2 は道路、 A_3 はそれ以外の土地利用である。なお、これらの対応した粗度係数は、以下の通りである。

農地	$n_1 = 0.060$
道路	$n_2 = 0.047$
上記以外の土地利用	$n_3 = 0.050$

メッシュ内の土地利用面積は国土数値情報（土地利用メッシュ【100mメッシュ】）を利用して非構造格子に配分した。ここで設定した土地利用面積より建物占有率 θ を算出すると同時に、農地・道路・その他の加重平均によりメッシュごとの底面粗度係数を算出した。

堤内地の底面粗度係数分布図を図9.3.13に示す。なお、市街地について拡大したものを図9.3.14に示す。

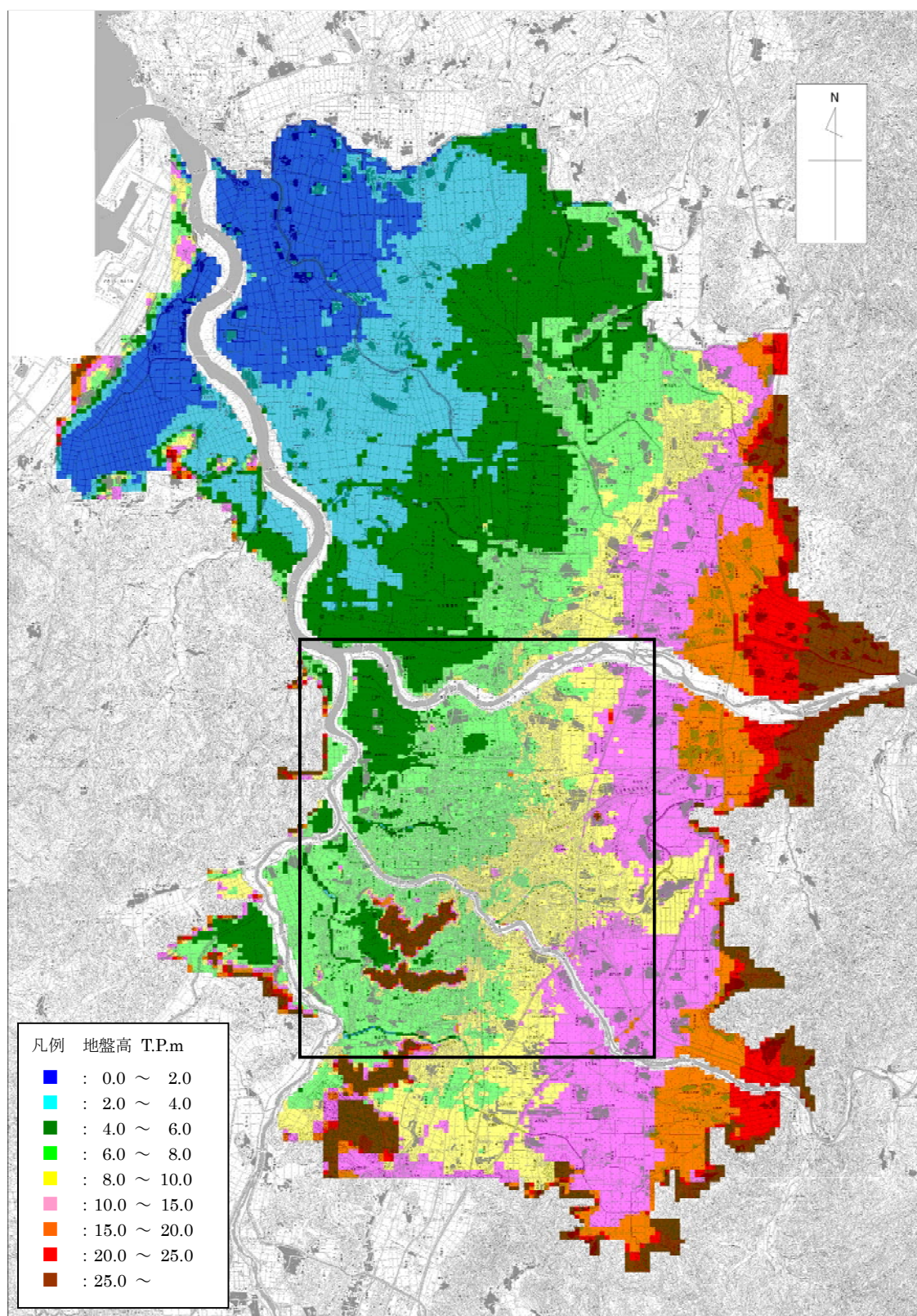


図 9.3.12 道路を考慮したメッシュ平均地盤高

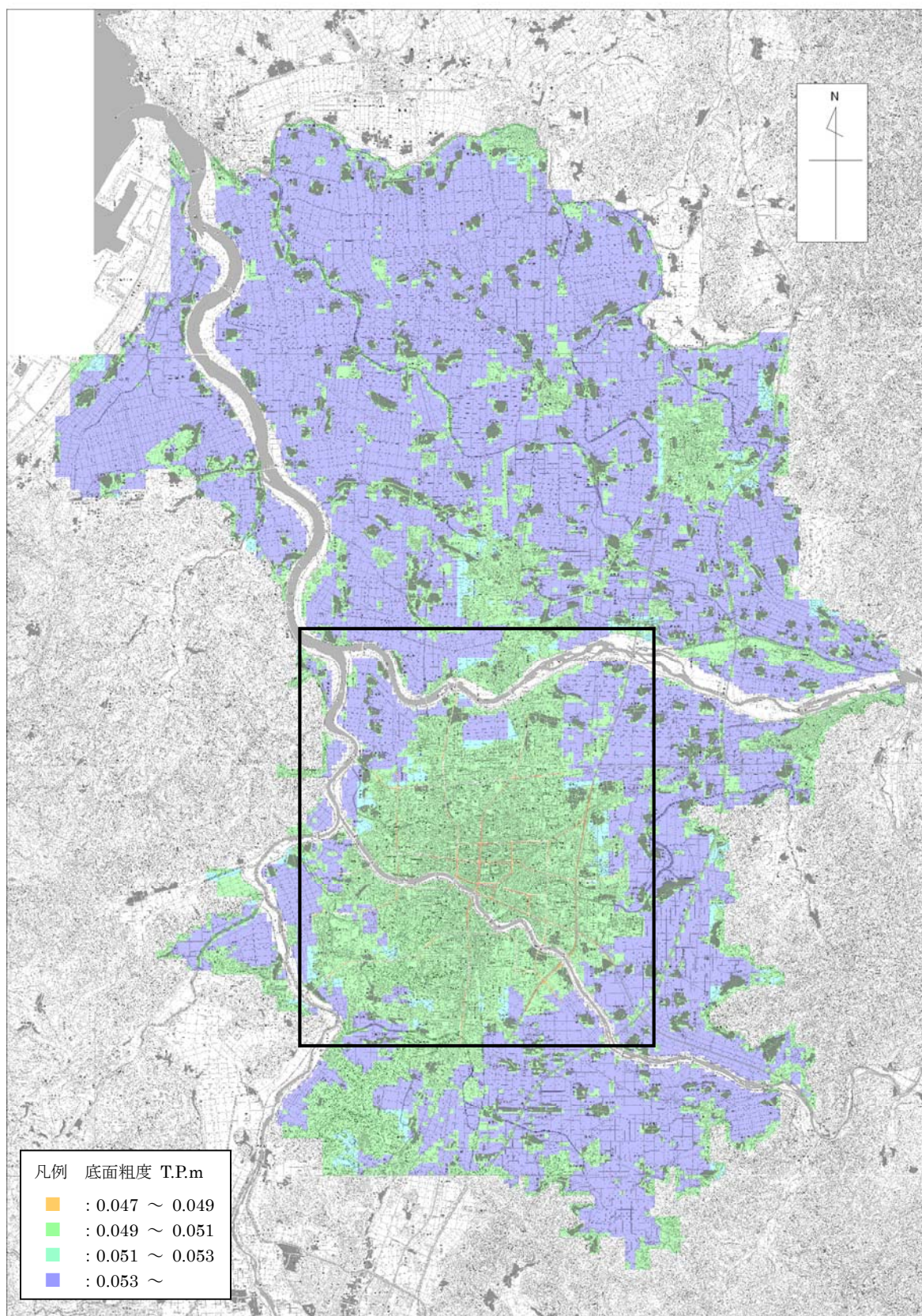


図 9.3.13 道路を考慮した粗度係数分布図

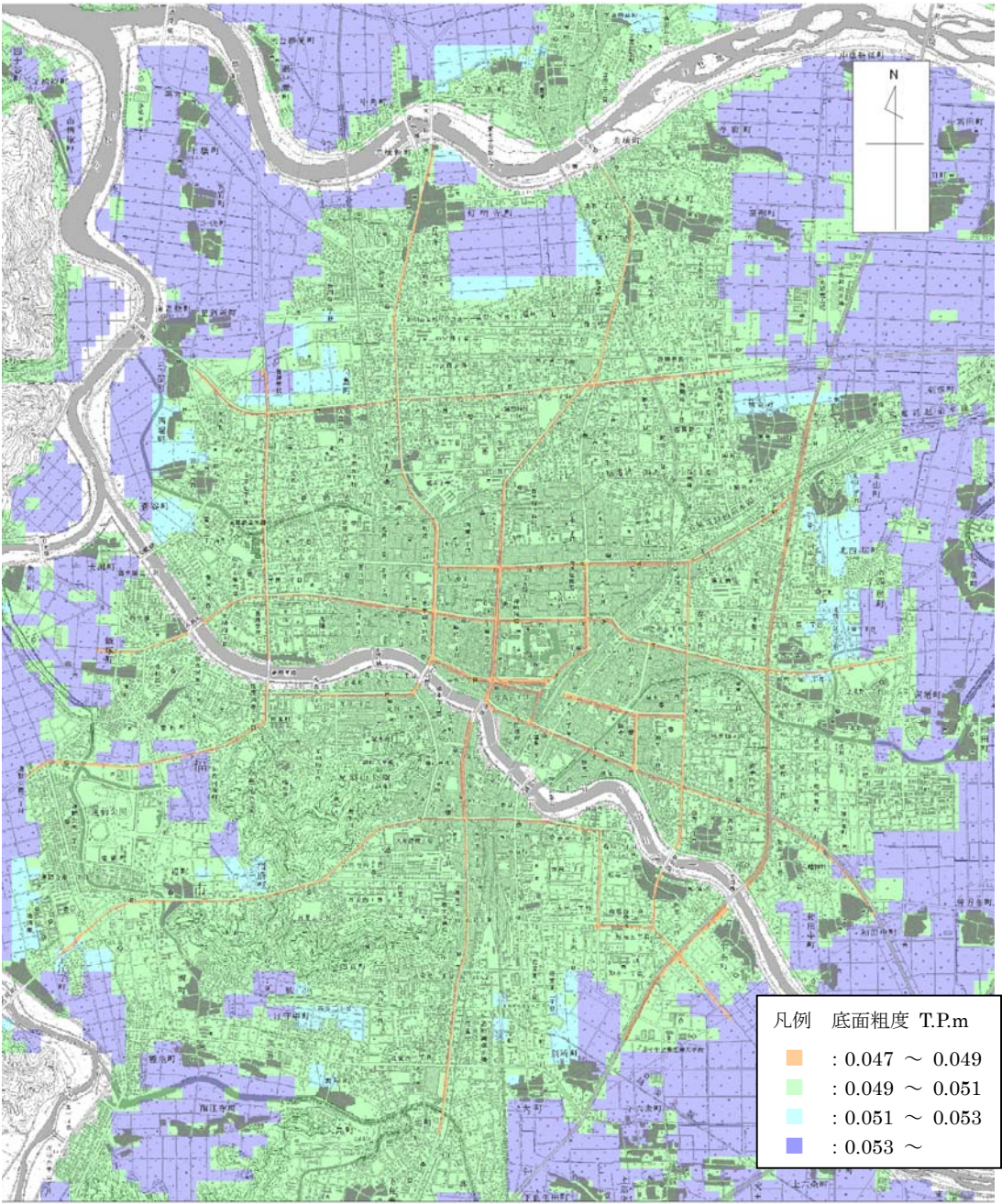


図 9.3.14 福井市街地を拡大した粗度係数分布図

(4) 盛土構造物を考慮した水理モデル²⁴⁾

氾濫原における盛土構造物は、道路、鉄道、内水河川堤防等の構造物を基として非構造格子モデルに対応するよう設定した。盛土の越水・カルバートを通過する氾濫水の流れは、メッシュ毎に平均盛土高を計測し、以下に示す本間の越流公式を用いて計算する。また、盛土の中に大規模なボックスカルバート等の氾濫水を流下させる開口部が存在する場合には、オリフィスとして扱うなど氾濫計算において考慮するものとした。

1) 正面越流の場合の越流量 Q_0

$h_2/h_1 < 2/3$ のとき、完全越流と想定して、以下の式で計算を行う。

$$Q_0 = 0.35 \times h_1 \sqrt{2gh_1} \times B \quad (15)$$

$h_2/h_1 \geq 2/3$ のとき、潜り越水と想定して、以下の式で計算を行う。

$$Q_0 = 0.91 \times h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \times B \quad (16)$$

ここに、 h_1 は上流側水深、 h_2 は下流側水深を表す。

2) 横越流の場合の越流量

$$I > 1/12,000 \quad Q/Q_0 = \cos(155 - 38 \times \log_{10}(1/I)) \quad (17)$$

$$1/12,000 \geq I \quad Q/Q_0 = 1 \quad (18)$$

ここに、 I は河床勾配を表す。

3) 開口部からの流出量

土木研究所で提案された、以下の3つの流出形態毎に応じた計算式を用いた。

$$\text{潜り流出：} h_2 \geq H \quad Q = CBH \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad C = 0.75 \quad (19)$$

$$\text{中間流出：} h_2 < H, h_1 \geq 3/2 H \quad Q = CBH \sqrt{2gh_1} \quad C = 0.51 \quad (20)$$

$$\text{自由流出：} h_2 < H, h_1 < 3/2 H \quad Q = CBh_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad C = 0.79 \quad (21)$$

ここに、 H は樋門高さ、 B は樋門幅、 h_1 ：樋門敷高から測った高い方の水深、 h_2 ：樋門敷高から測った低い方の水深である。上記の自由越流の場合における、 $h_1/h_2 \geq 3/2$ の場合は、 $h_2 = 2/3 h_1$ に置き換えた。

(5) 排水施設のモデル^{25) 26)}

氾濫原内に存在する樋門、排水ポンプを氾濫水理解析モデルに反映させるため、内水排水モデルの構築を行った。モデル化の対象とした排水施設の諸元を表 9.3.2～表 9.3.4 に、位置図を図 9.3.15～図 9.3.17 に示す。

1) 樋門のモデル化

樋門の操作方法については、各樋門の操作状況をモデルにリアルタイムで反映させることができれば、実際の操作を反映した予測が可能となる。しかしながら、現実には、そのデータをリアルタイムで情報入手することは困難であることから、計算水位の精度を向上させるためのフィードバック手法の適用が不可能である。また、これらの問題を解決しても、フィードバックに要する膨大な計算時間が必要となり、後述する想定氾濫結果をユーザ（職員）に提供するために要する時間（30 分）内に計算が完了することが困難となる。したがって、本モデルにおける樋門の操作方法は、計算により求めた外水位（本川）が内水位（支川・水路）より高くなり逆流を生じる場合には全閉するものとした。

樋門からの流出量には、盛土の開口部と同様の算定式を用いた。

2) 排水ポンプのモデル化

氾濫水理解析における排水ポンプは、併設されている樋門の開閉状況と連動するように設定する。すなわち、ポンプ排水量 Q_p (m³/s) は以下のように設定することとする。

a) 樋門が開いているとき（外水位 ≤ 内水位のとき）

$$Q_p = 0 \quad (22)$$

b) 樋門が閉じているとき（外水位 > 内水位のとき）

当該ポンプの集水エリアに溜った氾濫水 V (m³)、計算時間間隔 dt (s)、ポンプの最大排水能力 Q_{pMAX} (m³/s) とすると、式(23)および(24)のように表される。

$$Q_p = V / dt \quad (V / dt \leq Q_{pMAX} \text{ のとき}) \quad (23)$$

$$Q_p = Q_{pMAX} \quad (V / dt > Q_{pMAX} \text{ のとき}) \quad (24)$$

表 9.3.2 氾濫原内排水施設一覧表（九頭竜川）

No.	名 称	位 置	幅(m)	高さ(m)	門数	吞口(TP+m)	吐口(TP+m)	排水量(m ³ /s)	目 的	施設の有無	備 考	
40	新保樋門	2.6 k + 95 m	左岸	φ 600	1	0.331	0.108	—	一般排水	有	会長	
41	片川樋門	3.8 k + 283 m	左岸	5.60	2.80	1	—	-0.710	一般排水	有	国(2.0m ³ /s)	
42	片川排水機場							2.000	排水機場	有		
43	片川放水路樋門	7.0 k + 36 m	左岸	5.20	4.70	1	—	—	一般排水	有	片川放水路樋門(国)	
44	片川排水樋門	7.0 k + 150 m	左岸	φ 1850 φ 1300	1 2	-1.200	-1.250	9.600	一般排水	有	県(9.6m ³ /s)	
45	片川排水機場							—	排水機場	無		
46	布施田排水樋門	7.0 k + 35 m	左岸	1.70	2.00	2	—	—	一般排水	有	県(5.7m ³ /s)	
47	布施田排水機場							5.700	排水機場	有		
48	浦島水閘	10.8 k + 13 m	左岸	φ 500	1	2.879	2.506	—	一般排水	有	江上土改	
49	江上排水樋門	13.0 k + 148.1 m	左岸	1.00	1.00	1	2.200	—	一般排水	有	江上悪水樋門(会長)	
50	天満石樋門	13.4 k + 170 m	左岸	φ 600	1	3.510	—	—	一般排水	有	国	
51	大安寺排水樋門	14.4 k + 300 m	左岸	1.20	1.30	2	2.620	2.480	5.600	農水排水	有	県(5.6m ³ /s)
52	大安寺排水機場							—	排水機場	有		
53	落合排水樋門	15.4 k + 82 m	左岸	2.00	2.00	2	1.914	1.759	1.400	農水排水	有	県(1.4m ³ /s)
54	落合排水機場							—	排水機場	有		
55	馬渡川排水樋門	17.6 k	左岸	1.80 1.55	1.80 1.55	2 2	2.700	2.650	3.560	一般排水	有	県(3.56m ^{2/3})
56	馬渡川排水機場							—	排水機場	無		
57	江尻水閘樋門	18.0 k + 162 m	左岸	φ 300	1	5.928	5.152	—	一般排水	有		
58	舟橋取水樋門	18.8 k + 148 m	左岸	1.00	1.00				工水取水	有	県(0.17m ³ /s)	
59	陸海工水補助取水口		左岸						—	無	県・工	
60	六浦水閘	19.0 k + 107 m	左岸	0.50	1.00	1	5.118	4.933	—	一般排水	有	福井市
61	舟橋悪水樋門	19.6 k + 312 m	左岸	0.60	0.80	1	6.902	6.700	—	一般排水	有	福井市
62	千成寺川排水樋門	20.2 k + 42 m	左岸	1.50	1.50	2	5.200	5.100	1.850	農水排水	有	県(1.85m ³ /s)
63	千成寺川排水機場							—	排水機場	有		
64	寄揚排水樋門	20.8 k + 100 m	左岸	5.00	2.50	1	5.300	5.300	5.700	農水排水	有	県(5.7m ³ /s)
65	寄揚排水機場							—	排水機場	有		
66	川崎悪水樋門	3.8 k + 101 m	右岸	0.90	1.20	1	0.712	0.220	—	一般排水	有	井場土改
67	九頭竜川排水樋門	5.0 k + 120 m	右岸	1.40 0.70	1.40 1.40	1	-0.200	-0.200	3.200	下水排水	有	県(3.2m ^{3/4})
68	九頭竜川排水機場							—	排水機場	無		
69	池見排水樋門	5.0 k + 120 m	右岸	3.45	1.75	1	0.070	0.070	8.500	水排水・排水機	有	井場土改
70	池見排水機場		右岸					—	排水機場	無	井場土改(0.4m ³ /s)	
71	小桶排水樋門	5.4 k + 80 m	右岸	3.45	1.75	1	-0.564	-0.564	8.445	農水排水	有	県(8.45m ³ /s)
72	小桶排水機場							—	排水機場	有		
73	小桶悪水樋門	6.0 k + 11 m	右岸	1.00	1.00	1	0.516	0.332	—	農水排水	有	坂井西部土改
74	二の関排水樋門	7.0 k + 188 m	右岸	105.00	2.00	1	0.450	0.450	—	農水排水	有	春江北部土改
75	鷺排水樋門	9.2 k + 85 m	右岸	2.00	2.00	3	0.350	0.350	2.000	農水排水	有	県(2.07m ³ /s)
76	鷺排水機場							—	排水機場	有		
77	布施田排水樋門	10.0 k + 125 m	右岸	0.80	1.00	1	2.810	2.712	—	農水排水	有	会長
78	取次悪水樋門	10.4 k + 106 m	右岸	1.20	1.20	1	2.250	4-227	—	農水排水	有	春江北部土改
79	磯部川樋門	11.4 k + 20 m	右岸	4.50	6.60	3	—	-0.500	5.000	農水排水	有	国(5.0m ³ /s)
80	磯部川排水機場							—	排水機場	有		
81	八ヶ悪水樋門	12.0 k + 60 m	右岸	2.20	2.40	2	1.114	1.000	—	農水排水	有	県
82	八ヶ排水樋門	12.0 k + 100 m	右岸	2.00	2.00	1	0.900	0.900	4.320	農水排水	有	県(4.32m ³ /s)
83	八ヶ悪水排水機場							—	排水機場	有		
84	肴橋排水樋門	12.8 k + 72.3 m	右岸	3.00	1.80	1	2.010	2.010	—	農水排水	有	肴橋樋門(会長)
85	高屋排水樋門	13.6 k + 180 m	右岸	1.50	1.50	1	2.580	2.566	—	農水排水	有	県
86	水轟排水樋門	15.2 k + 48.9 m	右岸	1.00	1.00		3.4-24	3.015	—	一般排水	有	水轟悪水樋門(会長)
87	天池水閘	18.8 k + 113 m	右岸	0.80	1.00	1	—	4.508	—	一般排水	有	国
88	芳野川樋門	20.0 k	右岸	4.20	3.60	2	—	3.444	—	一般排水	有	国
89	五領排水樋門	24.0 k + 100 m	右岸	2.50	2.50	2	—	11.000	—	一般排水	有	国

表 9.3.3 氾濫原内排水施設一覧表（日野川）

No.	名 称	位 置	幅(m)	高さ(m)	門数	吞口(TP+m)	吐口(TP+m)	排水量(m ³ /s)	目 的	施設の有無	備 考
1	南橋原排水樋門	0.0 k + 9 m 左岸	1.75	1.50	2	3.687	—	—	一般排水	有	会長
2	下市悪水機樋門	3.8 k + 43 m 左岸	1.20	0.20	1	3.951	3.840	—	一般排水	有	会長
3	大廻排水樋門	7.8 k + 70 m 左岸	2.75	2.50	1	3.926	3.658	3.000	農水排水	有	県(3.0m ³ /s)
4	大廻排水機									無	
5	片粕排水樋門	8.8 k + 42 m 左岸	φ 800		1	5.632	5.322	—	一般排水	有	国
6	朝宮排水樋門	9.6 k + 11 m 左岸	1.00	1.00	1	6.402	6.348	—	一般排水	有	清水町
7	新田樋門	1.0 k + 128 m 右岸	1.50	1.50	2	2.862	2.689	2.678	一般排水	有	福井市(2.68m ³ /s)
8	新田排水機場									無	
9	深谷樋門	1.6 k + 100 m 左岸	1.80	1.40		3.053	2.901	—		無	
10	海老助排水樋門	2.4 k + 75 m 右岸	1.50	1.20	1	2.661	2.390	—	一般排水	有	海老助樋門(県)
11	底喰川樋門(建)	2.8 k + 135 m 右岸	3.85	3.50	4		1.000	12.300	排水機場	有	国(0.6m ³ /s)、福井市(11.7m ³ /s)
	底喰川排水機									無	
12	底喰川排水樋門	2.8 k + 180 m 左岸	φ1500・φ1300	2・1	1.783	2.630	12.700	排水機場	有	無	県(12.7m ³ /s)
13	大瀬水閘	4.2 k + 40 m 右岸	0.92	0.77		(6.0)	—	—		有	福井市
14	大瀬水閘	4.6 k + 35 m 右岸	1.20	1.35	1	3.964	3.891	—	一般排水	有	会長
15	角折水閘	5.2 k + 75 m 右岸	0.80	1.00	1	5.423	5.395	—	一般排水	有	会長
16	狐川樋門	5.5 k 右岸	4.20	3.20	1	—	0.600	15.000	一般排水	有	県(15.0m ³ /s)
	狐川排水機場								排水機場	有	
17	下野水閘	6.0 k + 70 m 右岸	1.20	1.40		3.894	3.638	—		無	福井市
18	下江守排水閘	9.2 k + 190 m 右岸	0.45	0.45	1	5.993	5.872	—	一般排水	有	会長
19	江端川水閘	10.6 k + 152 m 右岸	18.60	22.30	1	—	0.200	—	一般排水	有	江端川水門(国)
20	江端川排水機場	10.8 k + 52 m 右岸	3.50	3.50	1	—	2.900	22.200	排水機場	無	
21	江端川第二排水機場	10.8 k + 88 m 右岸	3.00	3.00	2	—	3.150	22.200	排水機場	無	
22	末更毛川水閘	6.6 k + 161 m 左岸	2.70	4.80	2	—	2.895	—	一般排水	有	国土交通省
23	志津川水閘	7.4 k + 45 m 左岸	3.50	5.00	4	—	2.248	—	一般排水	有	国土交通省

表 9.3.4 氾濫原内排水施設一覧表（足羽川）

No.	名 称	位 置	幅(m)	高さ(m)	門数	呑口(TP+m)	吐口(TP+m)	排水量(m³/s)	目 的	施設の有無	備 考
22	水越ポンプ場	1.3 k + 130 m	右岸	φ1,800	1		2,695	5.1	下水道	有	福井市
23	加茂河原ポンプ場	1.8 k + 75 m	左岸	φ1,500	1		4,280	6.5	下水道	有	福井市
24	照手ポンプ場	2.8 k + 110 m	右岸	φ900	2		4,300	2.8	下水道	有	福井市
25		" k + " m	"	φ1,300	1		4,369				
26	足羽ポンプ場	3.4 k + 40 m	左岸	φ1,500	1		5,077	2.8	下水道	有	福井市
27	佐佳枝ポンプ場	3.6 k + 170 m	右岸	φ900	2		4,400	4.9	下水道	有	福井市
		" k + " m	"	φ600	2		4,400				
		" k + " m	"	φ1,500	1		4,900				
28	荒川第一排水機場	4.2 k + 0 m	右岸	3.70	3.50	1	4,000	8.3	一般排水	有	福井県
29	荒川水門	" "	"	14.10	10.00	2	2,000		"	"	"
30	荒川第二排水機場	" "	"	3.10	3.10	2	8,210	33.2	"	"	"
31	木田ポンプ場	4.6 k + 100 m	左岸	φ1,200	1		5,210	2.0	下水道	有	福井市
32	木田東ポンプ場	4.8 k + 0 m	左岸	φ1,200	1		7,304	2.0	下水道	有	福井市
33	出作ポンプ場	5.8 k + 100 m	右岸	φ2,000	1		5,130	4.8	下水道	有	福井市
34	平和水閘	6.0 k + 140 m	右岸	1.60	1.60	1					福井市
35	和田排水機場	7.0 k + 65 m	右岸	2.15	1.80	1	8,880	0.7			福井足羽土地改良区
36	六条排水機場	7.2 k + 90 m	左岸	3.60	2.50	2		5.0	農地	有	福井足羽土地改良区
37	梅野排水樋門	7.4 k + 70 m	右岸	2.00	1.75	2		9,237			

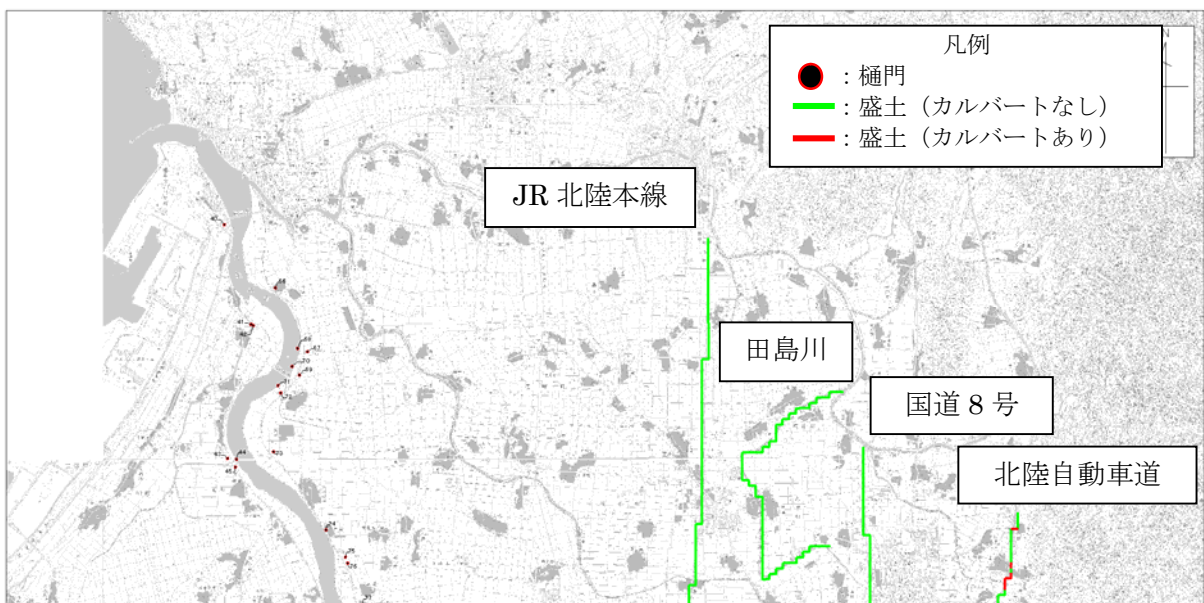


図 9.3.15 盛土・カルバート、樋門、排水機場の位置図（九頭竜川下流）

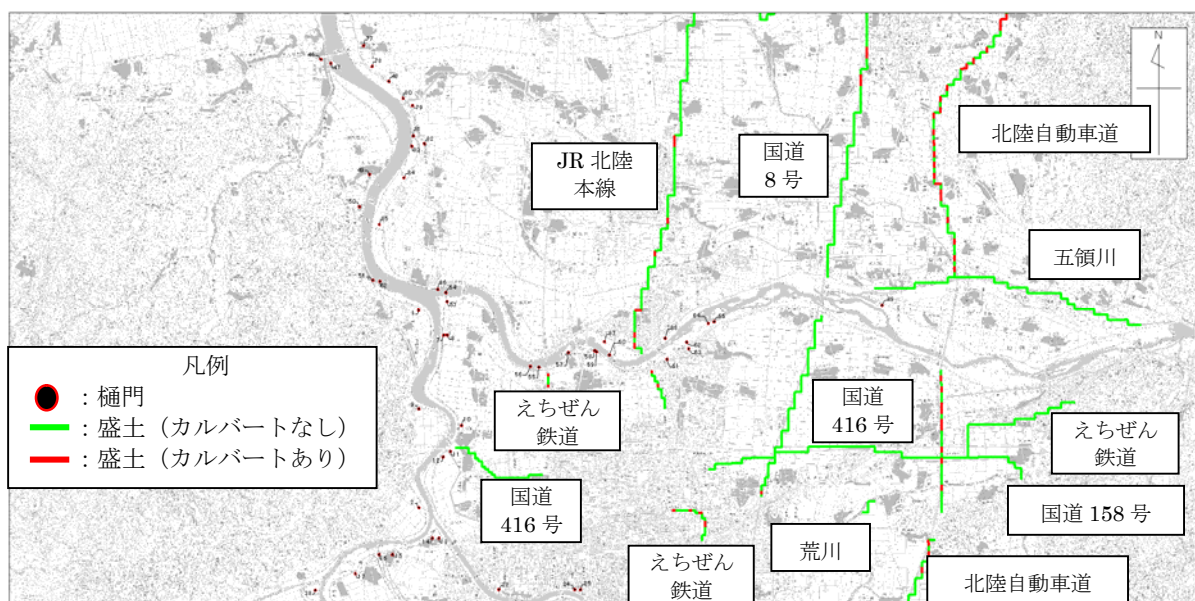


図 9.3.16 盛土・カルバート、樋門、排水機場の位置図（九頭竜川中流部・日野川）

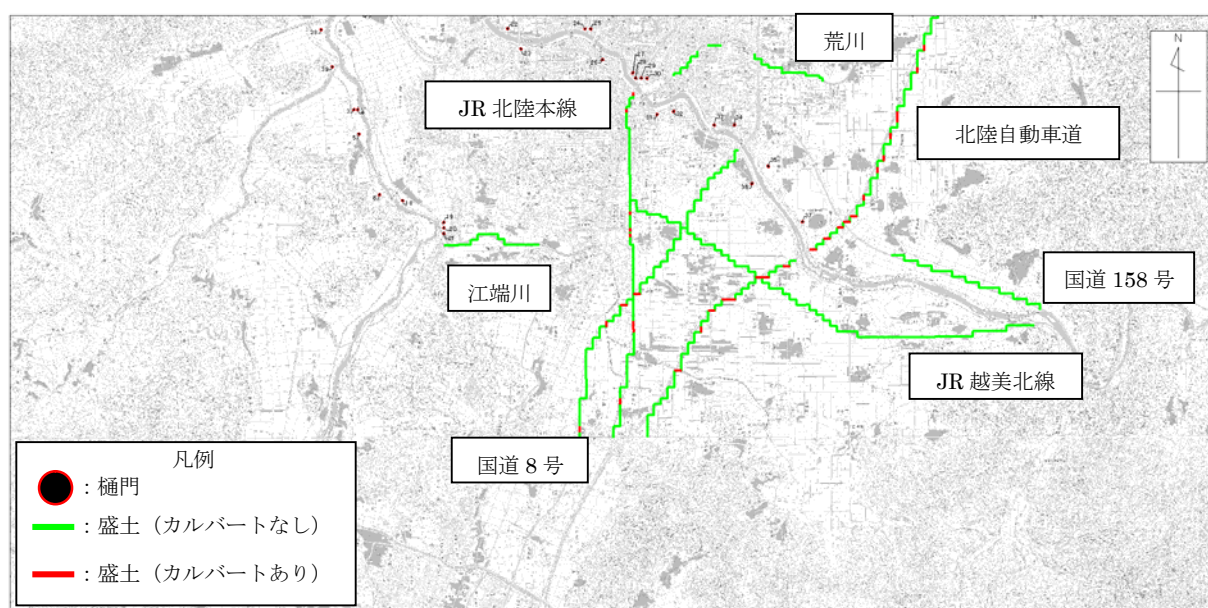


図 9.3.17 盛土・カルバート，樋門，排水機場の位置図（日野川・足羽川）

9.3.6 内水流出・氾濫モデルの概要

図 9.3.18 に内水流域から流出量と支川モデルの模式図を示す。内水河川の上流端に，内水流域からの流出量を合理式で与え，一次元不定流解析により河道内の水位を算定し，越水の条件を超える場合，ポンドモデルによって溢水量を算定するとともに，氾濫範囲を推定する方法を用いた。

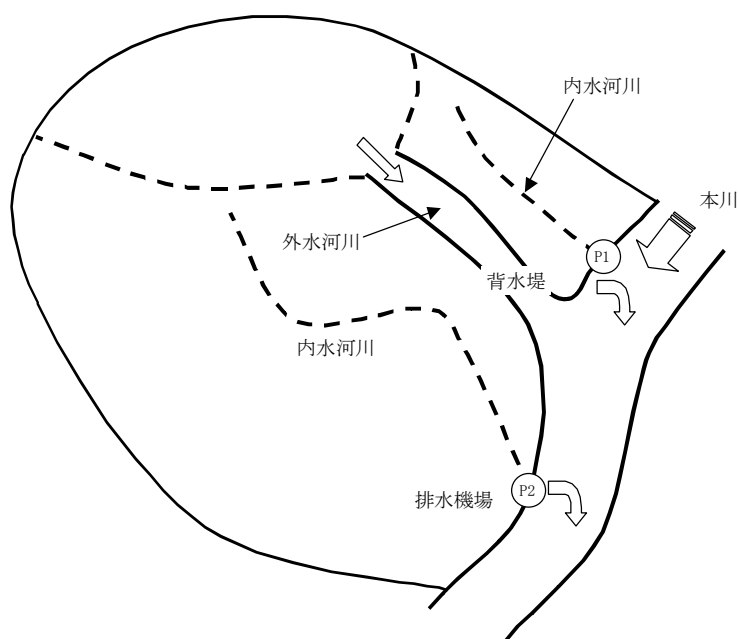


図 9.3.18 支川モデルの模式図

支川モデルは堤内地メッシュの境界部分に設定し、内水河川の横断面形状は、川幅および河積見合いの矩形で近似し、対応するメッシュの地盤高相当で河岸高を設定した。河道内の水位が河岸高を越えた場合には、その河道が存在する解析メッシュに越流する。また、本川合流部には、実際の施設の状況に応じて樋門や排水ポンプを設置することで、本川水位と内水排水の関係についても表現することが可能である。

表 9.3.5 には、内水河川としてモデルに組み込んだ先述した 11 河川の諸元を示す。

表 9.3.5 対象 11 河川の諸元

水路 No.	河川名	河積 (m^2)	川幅 (m)	水路高 (m)	河床高 (TP+m)	形状
1	磯部川	20.00	10.00	2.00	2.35	築堤
2	八ヶ川	24.03	8.20	2.93	0.82	掘込
3	馬渡川	70.23	12.13	5.79	1.07	掘込
4	芳野川	69.34	13.36	5.19	3.50	掘込
5	底喰川	137.76	21.00	6.56	0.08	掘込
6	荒川	106.00	32.12	6.90	3.60	掘込
7	狐川	121.49	31.38	3.87	0.61	掘込
8	江端川	263.97	47.30	5.58	-1.66	掘込
9	志津川	107.94	43.45	2.48	3.84	掘込
10	未更毛川	289.66	60.73	4.77	1.13	掘込
11	兵庫川	109.14	34.30	3.18	1.98	築堤

※ 各河川の諸元は、本川合流付近の値を示す。

※ 掘込 or 築堤の別は、主な形状で代表させて示している。

上記の対象河川の上流端に流出量を与え、支川の水位と溢水量等を計算するために、流域を再分割した。その結果を表 9.3.6 に、再分割した流域を図 9.3.19 示す。この分割した流域面積比で流量ハイドロを設定することとした。

表 9.3.6 分割後流域面積および流入先

分割前面積 面積(km^2)	分割後 (図 9.3.19 参照)			備考
	名称	面積(km^2)	流入先	
① : 90.6	A	40.0	九頭竜川 10.2k	
	B	9.2	磯部川	
	C	12.3	八ヶ川	
	D	2.7	芳野川	
	E	9.9	九頭竜川 15.2k	
	F	5.3	馬渡川	
	G	11.3	底喰川	
② : 78.0	H	3.08	日野川 4.2k	
	I	16.3	未更毛川	
	J	26.2	志津川	
	K	18.8	狐川	
③ : 47.6	L	47.6	荒川	再分割なし
④ : 72.8	M	33.4	江端川	②流域の一部分を含めた値
	N	53.0	日野川 8.2k	

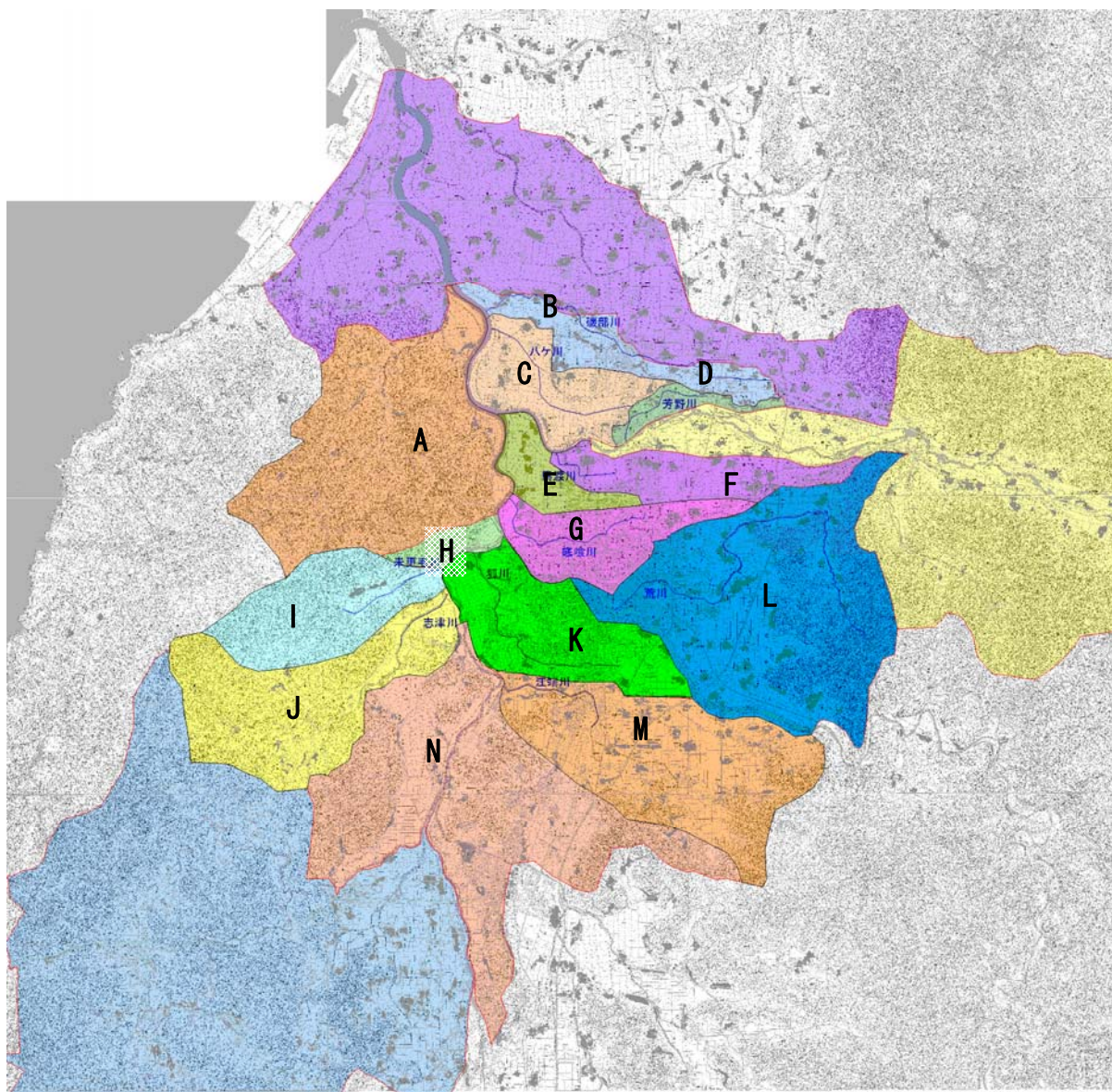


図 9.3.19 分割後の支川流域界の設定

9.3.7 堤内地内の降雨・湛水モデルの概要

(1) 雨量データによる湛水

洪水氾濫予測システムでは、堤内地内支川氾濫とは別に、降雨～湛水が発生する箇所を予測する必要がある。そこで、降雨による氾濫原湛水の取り扱いは、リアルタイムシミュレーションの手引き（案）²⁷⁾を参考に、連続式により求まる水深 h に当該時刻降雨 R_t を加算する。

$$h_t = h + r\Delta t \quad (25)$$

$$r = \frac{R_t f}{3.6} \quad (26)$$

ここに、 f は流出率、 R_t は該当メッシュの雨量強度 (mm/hr)、 h_t は該當時刻 t の氾濫水深である。

さらに、実現象に近い状態を再現するために、流域の貯留を考慮した貯留関数法²⁸⁾で用いられている一次流出率 f_I 、飽和流出率 f_{sa} 、および飽和雨量 R_{sa} について取り入れることとした。

なお、これらの定数は土地利用ごとに算出する必要があり、表 9.3.7 に示す標準値を用いることとした。

表 9.3.7 $f_I \sim R_{sa} \sim f_{sa}$ の標準値²⁸⁾

土地利用		f_I	R_{sa}	f_{sa}
水田		0.00	50.0	1.0
畑地		0.15	300.0	0.6
山林		0.25	150.0	1.0
市 街 地	1) 区間割道路整備ができるが相当緑地面積が残る。 排水路整備済。	0.60	55.0	1.0
	2) 道路舗装がかなり進む。下水路整備不十分。	0.70	55.0	1.0
	3) 舗装されるべき面積の 50%以上が舗装され、下 水路整備もほぼ十分。	0.80	55.0	1.0
	4) 舗装されるべき面積の舗装。下水路整備完了。	0.90	55.0	1.0

なお、各内水河川において対象氾濫原外に流域がある場合、洪水予測システムから得られた流出計算結果に流域面積比を乗じた流出量を上流端流量として与えることとする。また、後述する超過確率 150 年相当規模洪水での氾濫モデルの検証においては、レーダ雨量がないため、九頭竜川水系における治水計画で算定されている対象降雨の流域平均雨量を用いることとした。

(2) 下水道整備のモデルへの反映

対象流域内における下水道の整備状況を図に示す。図 9.3.20 のように下水道が整備されている地域については、排水効果が発現するものとして氾濫モデルに組み込む。

なお、下水道が整備されていない地域（田畑等）には、地盤高が周辺に比べて低いメッシュがあるため、常に湛水状態になる可能性がある。これらの地域においても側溝等により排水が可能であることを考慮して、氾濫モデルに組み込むこととした。

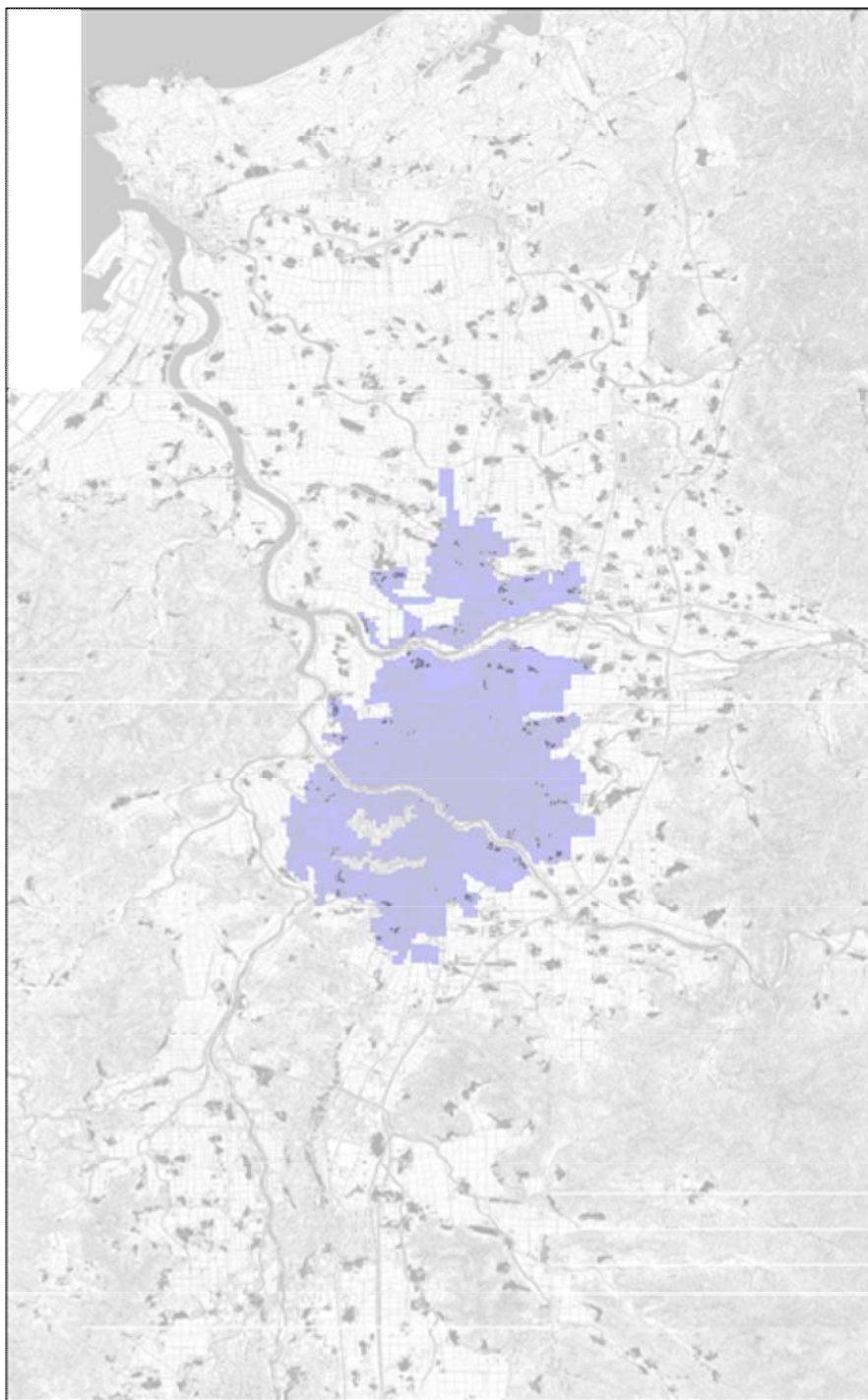


図 9.3.20 下水道の整備範囲

9.4 洪水氾濫予測モデルの検証

9.4.1 洪水氾濫解析の検証条件

(1) HQ 式による水位算定方法

河道の一次元不定流計算から得られた流量をもとに、不等流計算により得られた H-Q 式を用いて時間的な水位変化を算定した。

(2) 越水・溢水の条件

有堤部の越水高を河道の堤防高とし、無堤部の溢水高を河岸高とした。図 9.4.1 に示すように、河道の H-Q 換算水位が越水高、あるいは溢水高よりも高くなった場合、河道水位と堤内地水位とによる越流公式により氾濫量を算定した。その際、連続式における横流出量として取り扱った。

一方、氾濫域から河道への氾濫量は、越流公式を用いて算定し、上記と同様に横流入として取り扱った。なお、越水・溢水幅は、下記の破堤幅か、直下流越水・溢水地点までの距離のいずれか小さい方とした。

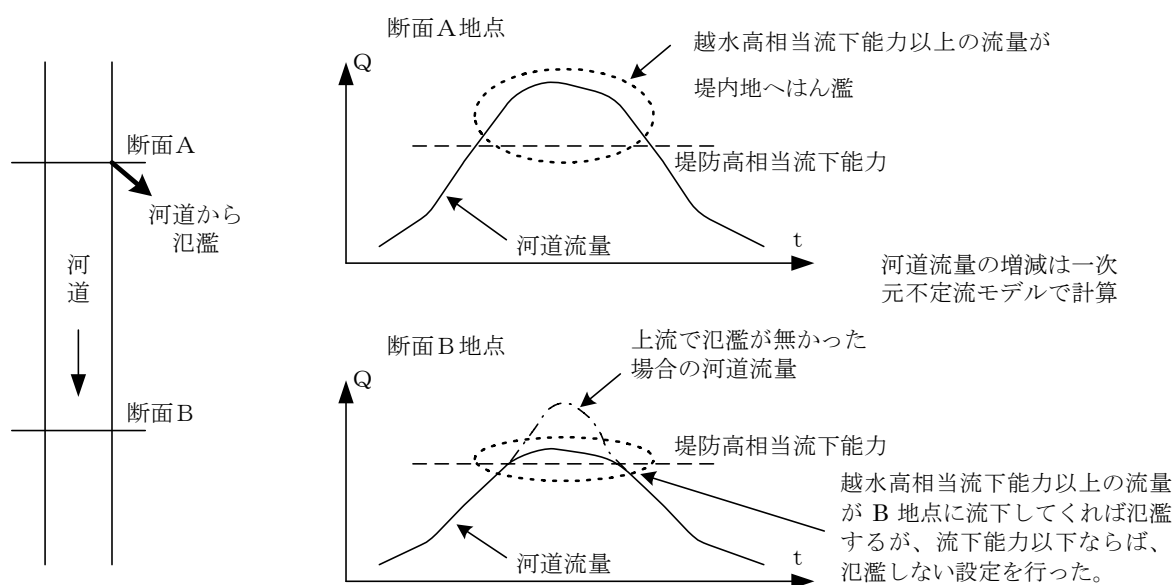


図 9.4.1 越水現象の表現方法

(3) 破堤の条件

文献 27)より、現況堤防形状の範囲において治水計画上の定規断面が確保できる形状を包括する堤防高から計画規模に対する堤防の余裕高を差し引いた高さ、河道計画における計画高水位（H.W.L.）とを比較し、何れかの低い水位を破堤開始水位として設定した。不定流計算過程において、河道の H-Q 換算水位が破堤開始水位よりも高くなった場合、河道水位と堤内地水位を用いた越流公式から氾濫量を算定した。なお、氾濫量の扱いは、越水・溢水と同様とする。

破堤幅については、破堤幅 Y (m) は破堤箇所が合流点付近か否かに分けて、川幅 X (m) から次式により算定する。なお、合流点付近とは、合流の影響が無視できない規模の河川が合流している場合で、その目安は、支川の川幅 X が本川の川幅の 3 割以上とし、影響区間は合流点から上下流に本川川幅の 2 倍程度の区間を目安とした。

$$\text{合流点付近の場合 } Y = 2.0 \times (\log_{10} X)^{3.8} + 77 \quad (25)$$

$$\text{合流点付近以外の場合 } Y = 1.6 \times (\log_{10} X)^{3.8} + 62 \quad (26)$$

堤防は基部まで破堤するものとし、堤防位置における堤内地盤高と河道高水敷高のいずれか高い方を破堤敷高とする。

破堤後瞬時に最終破堤幅の $Y/2$ が破堤し、その後 1 時間で最終破堤幅まで拡大するものとした。また、この間の破堤幅の拡大速度は一定とした。なお、破堤敷高は瞬時に上記の敷高となるものとした。

次に、破堤、溢水および越流時を想定した破堤箇所における越流量は、以下のように設定した。

1) 破堤に伴う越流量 Q は河床勾配 I に応じ区分した。

$$I > 1/1,580 \quad Q/Q_0 = (0.14 + 0.19 \log_{10}(1/I)) \cos(48 - 15 \log_{10}(1/I)) \quad (27)$$

$$1/1,580 \geq I > 1/33,600 \quad Q/Q_0 = 0.14 + 0.19 \log_{10}(1/I) \quad (28)$$

$$1/33,600 \geq I \quad Q/Q_0 = 1 \quad (29)$$

2) 溢水に伴う越流量 Q は河床勾配 I に応じ区分した。

$$I > 1/12,000 \quad Q/Q_0 = \cos(155 - 38 \times \log_{10}(1/I)) \quad (30)$$

$$1/12,000 \geq I \quad Q/Q_0 = 1 \quad (31)$$

ただし、 Q_0 は正面越流の場合の越流量であり、以下の本間の越流公式から算出される。

$$h_2/h_1 < 2/3 \text{ のとき, } Q_0 = 0.35 \times h_1 \sqrt{2gh_1} \times B \quad (32)$$

$$h_2/h_1 \geq 2/3 \text{ のとき, } Q_0 = 0.91 \times h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \times B \quad (33)$$

ここに、図 9.4.2 に示すように、堤内地盤高から見て、高い方の水深を h_1 、低い方の水深を h_2 とする。また、 B は破堤幅である。なお、越流公式による計算は、河道流量との収支を一切考慮していないため、計算上過大な流量が計算されることがある。これは、公式のそのものの適用限界があるものと考えられる。この問題に対して、越流公式により求めた流量 Q_B が越流敷高以上の流量 Q_D より大きい場合には便宜的に $Q_B = Q_D$ として計算を行った。

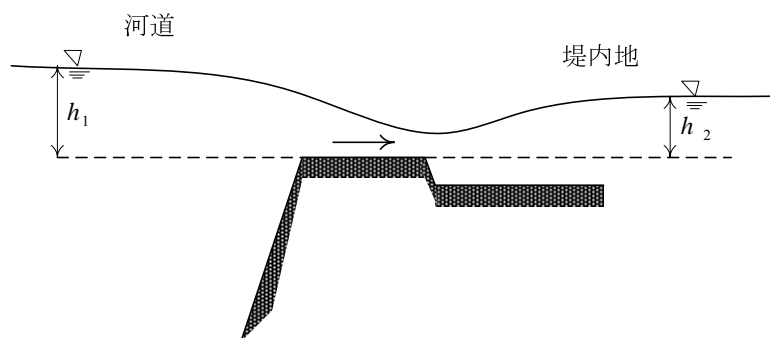


図 9.4.2 破堤地点の越流模式図

9.4.2 モデルの検証

(1) 対象洪水と検証内容

本検討では、九頭竜川の破堤・越水による浸水実績がないため、浸水想定区域図との比較により、構築した非構造格子モデルの検証を行う。ここで検証の対象を浸水想定区域図としたのは、平成 16 年に大きな災害が発生したものの、浸水範囲が足羽川流域のみとなっており、浸水実績との比較では九頭竜川、日野川の検証が困難である。また、足羽川の破堤についても、指定区間であり、範囲が明確となっていない。さらに、浸水想定区域図を検証対象にすれば、九頭竜川水系の浸水範囲を網羅できること、さらに河道条件、地盤高等が異なるもののデカルト座標系モデルとの比較も可能となる。なお、九頭竜川²⁹⁾、日野川²⁹⁾、足羽川³⁰⁾における浸水想定区域図は、国土交通省および福井県が公表しているものを参考とした。

次に、本検討における各河川における検証条件を表 9.4.1～表 9.4.4 に示す。今回検討でも浸水想定区域図と計算条件を一致させ、破堤地点ごとに氾濫解析を実施し、九頭竜川、日野川、足羽川それぞれについて全破堤地点分の最大浸水深を包絡した浸水深で検証を行った。

表 9.4.1 九頭竜川における検証条件

項目	平成 13 年度における条件 (デカルト座標系の氾濫解析モデル)			本章での条件 (非構造モデル)
外力	各基準地点における対象洪水 布施田・中角：昭和 50 年 8 月洪水 (1/150)			同左
河道	H9 年度測量横断			H19 年度測量横断
区間	-0.2K～31.2K			同左
出発水位	T.P.+0.635m			T.P.+0.56m
粗度係数	距離標	低水路	高水敷	同左
	-0.2～ 3.2	0.015	0.047	
	3.4～15.2	0.024	0.046	
	15.4～20.2	0.025	0.041	
	20.4～23.0	0.029	0.035	
	23.2～31.2	0.035	0.035	
水路モデル	なし			なし
地盤高	1/2,500 地形図の単点標高値をもとに設定			レーザープロファイラーデータをもとに設定
メッシュの大きさ	250m×250m			100m×100m を基本とし、都市部においては 50m×50m に細分化

表 9.4.2 日野川における検証条件

項目	平成 13 年度における条件 (デカルト座標系の氾濫解析モデル)	本章での条件 (非構造モデル)												
外力	各基準地点における対象洪水 深 谷：昭和 51 年 9 月洪水(1/150) 三尾野：昭和 40 年 9 月洪水(1/150)	同左												
河道	H9 年度測量横断	H19 年度測量横断												
区間	0.0K～11.0K	同左												
出発水位	T.P.+0.635m (九頭竜川河口)	T.P.+0.56m (九頭竜川河口)												
粗度係数	<table border="1"> <tr> <th>距離標</th><th>低水路</th><th>高水敷</th></tr> <tr> <td>0.0～ 4.2</td><td>0.026</td><td>0.039</td></tr> <tr> <td>4.3～ 9.3</td><td>0.032</td><td>0.040</td></tr> <tr> <td>9.4～11.2</td><td>0.040</td><td>0.041</td></tr> </table>	距離標	低水路	高水敷	0.0～ 4.2	0.026	0.039	4.3～ 9.3	0.032	0.040	9.4～11.2	0.040	0.041	同左
距離標	低水路	高水敷												
0.0～ 4.2	0.026	0.039												
4.3～ 9.3	0.032	0.040												
9.4～11.2	0.040	0.041												
水路モデル	なし	なし												
地盤高	1/2,500 地形図の単点標高値をもとに設定	レーザープロファイラーデータをもとに設定												
メッシュの大きさ	250m×250m	100m×100m を基本とし、都市部においては 50m×50m に細分化												

表 9.4.3 足羽川における検証条件

項目	H20 検討 (デカルトモデル)	今回検討 (非構造モデル)
外力	各基準地点における対象洪水 天神橋：昭和 51 年 9 月洪水(1/150)	同左
河道	激甚災害特別事業の河道	同左
区間	0.0K～12.6K	同左
出発水位	T.P.+0.56m (九頭竜川河口)	同左
水路モデル	なし	なし
地盤高	1/2,500 地形図の単点標高値をもとに設定	レーザープロファイラーデータをもとに設定
メッシュの大きさ	250m×250m	100m×100m を基本とし、都市部においては 50m×50m に細分化

表 9.4.4 足羽川における粗度係数の検証条件

低水路		高水敷			
距離標	粗度係数	左岸 距離標	左岸 粗度係数	右岸 距離標	右岸 粗度係数
0.0～ 4.4	0.024	0.0k～6.4k	0.030	0.0k～5.2k	0.030
4.4～ 9.0	0.024	6.4k～8.0k	0.040	5.2k～5.8k	0.025
9.0～11.2	0.026	8.0k～12.6k	0.045	5.8k～6.4k	0.030
11.2～12.6	0.029			6.4k～8.0k	0.040
				8.0k～12.6k	0.045

(2) 外水氾濫の計算結果の検証

九頭竜川、日野川、足羽川それぞれについて、既往検討結果と今回のモデルでの解析結果を比較した。図 9.4.3～図 9.4.5 に比較結果を示す。

日野川、足羽川については、浸水深、浸水エリアともにおおむね一致しており、今回検討の氾濫モデルの妥当性が示された。

九頭竜川については、上流部の左岸側の浸水エリア以外はおおむね一致している。差異の生じている要因としては、破堤地点付近のメッシュ地盤高が異なっていることが考えられる。今回の検討で使用する氾濫解析モデルは、既往検討で使用されたモデルに比べてメッシュのサイズが小さく、微地形をより詳細に反映している。そのため、氾濫水のボリュームや、狭さく部からの回り込み等を詳細に表現できていると考えられる。

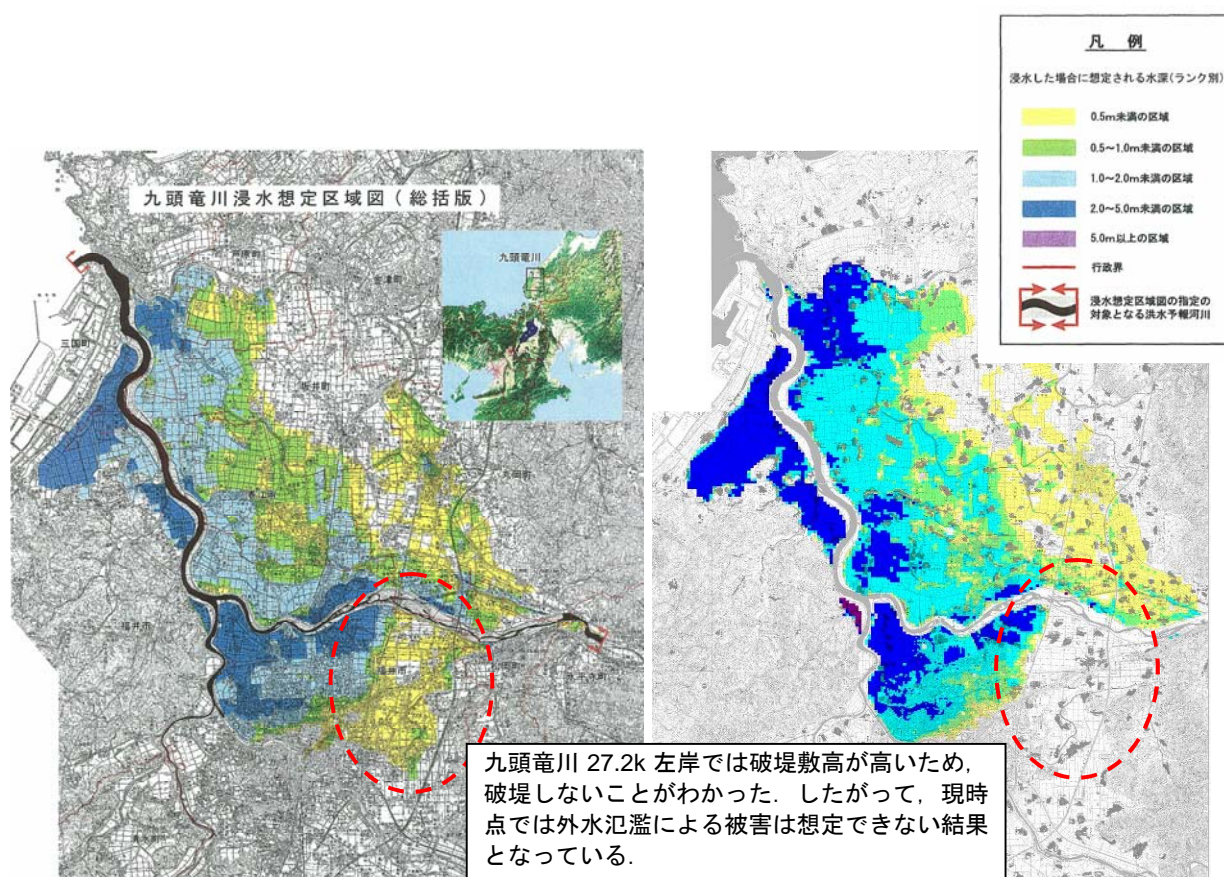


図 9.4.3 九頭竜川の浸水想定区域図の再現計算結果

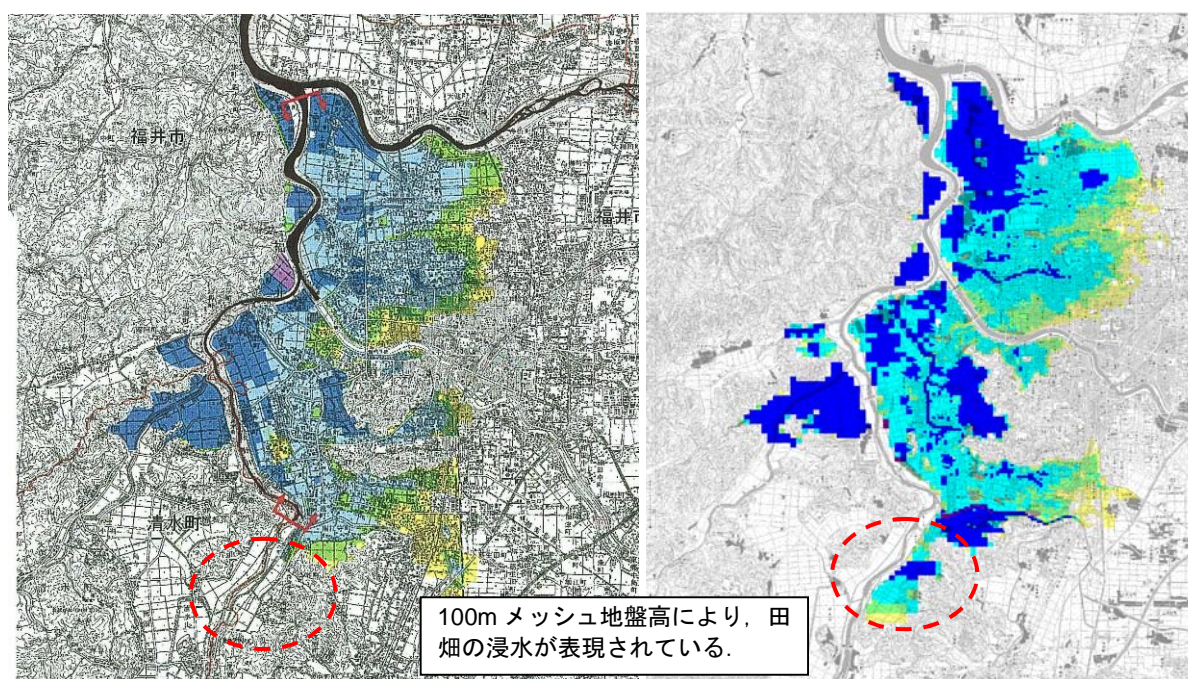


図 9.4.4 日野川の浸水想定区域図の再現計算結果

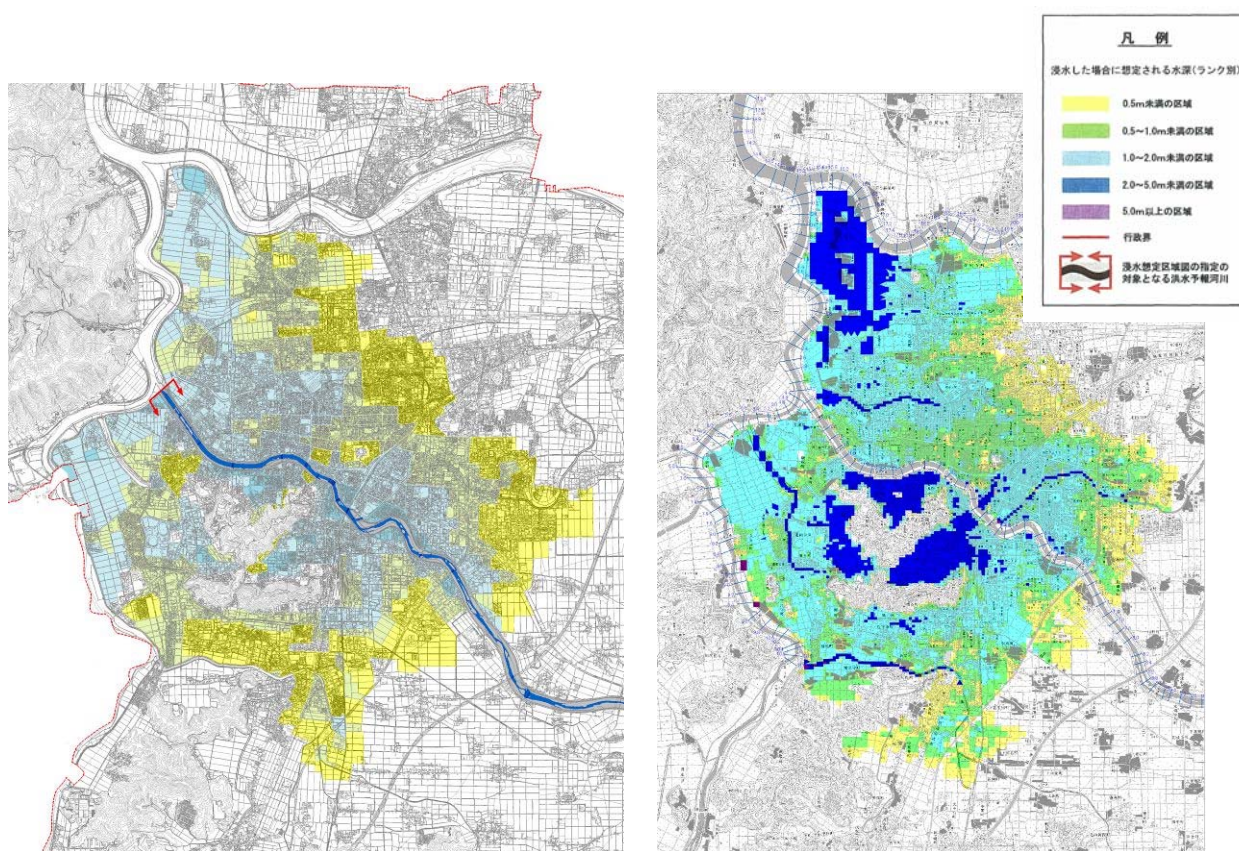


図 9.4.5 足羽川の浸水想定区域図の再現計算結果

(3) 主要道路や支川氾濫を考慮した計算結果の検証

1) 道路メッシュを導入による解析結果への影響

前出の検証を実施したモデルにおいて、道路メッシュを導入の効果を確認する。道路形状や路面高を考慮することにより、氾濫流の違いが顕著に表現することができる。その一例として、足羽川 5.0k 地点右岸を破堤地点とした条件での道路を考慮した場合としない場合の計算結果について比較する。

図 9.4.6 には、最大浸水深を比較した結果を示す。これによれば、道路メッシュの有無により浸水エリア、浸水深ともに大きな差はなく、モデルとしての妥当性は維持されていることがわかる。一方で、最大浸水深といった指標を表示する場合、道路を考慮するの違いは見られなかった。道路高がその周辺よりも高い場合は、氾濫の拡大は阻止される一方で、氾濫が貯留され、浸水深が増大し、人的被害発生するなどの被害が生じる可能性がある。このような結果は、今回見られなかったが、このような非常に狭い範囲で生じる可能性がある地域などは解析上配慮する必要がある。

次に、道路を考慮することによって氾濫過程に違いが生じている可能性がある。そこで、図 9.4.7～図 9.4.8 に浸水の拡大過程での浸水深分布を示す。道路沿いに浸水エリアが拡大している箇所や、逆に道路によって浸水エリアの拡大が阻まれている箇所が見て取れ、詳細な地盤形状が表現されていることがわかる。

本検討で構築されたモデルが組み込まれたリアルタイム・シミュレーション・システムでは、このような想定される現象を予測することが可能となる。

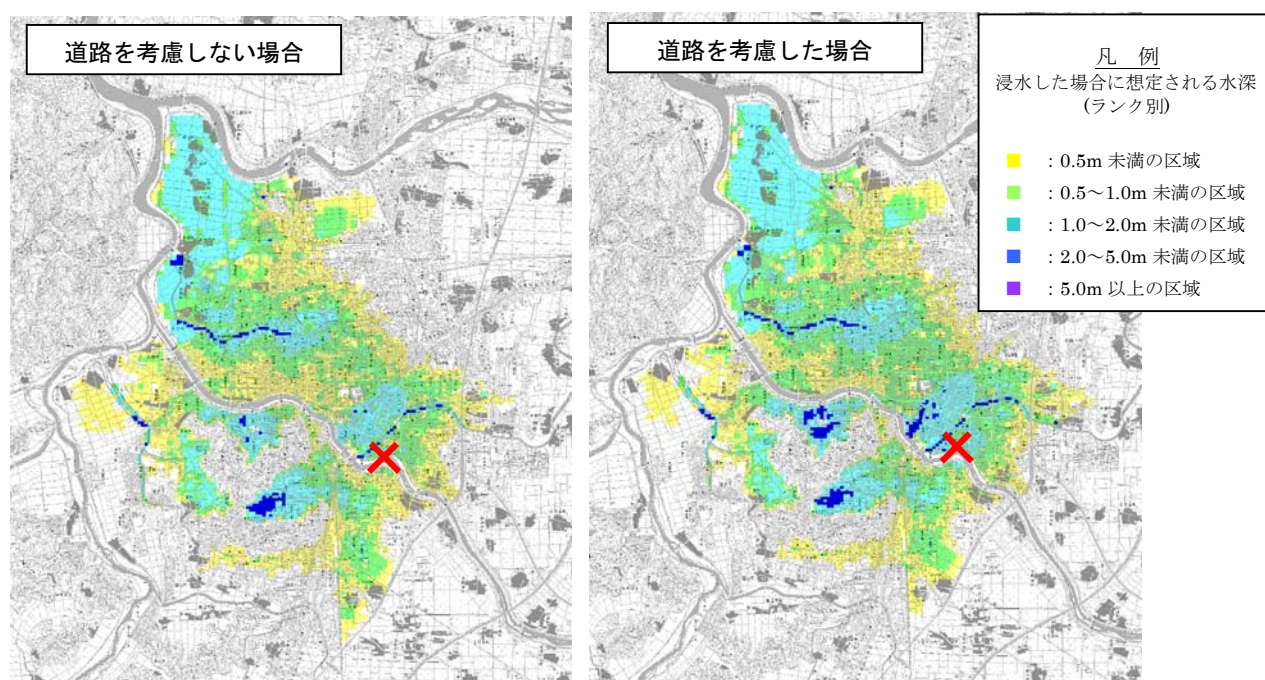


図 9.4.6 足羽川 5.0k 右岸破堤時の最大浸水深



図 9.4.7 氾濫開始直後の道路を考慮したときの浸水深の比較（足羽川 5.0K 右岸破堤）

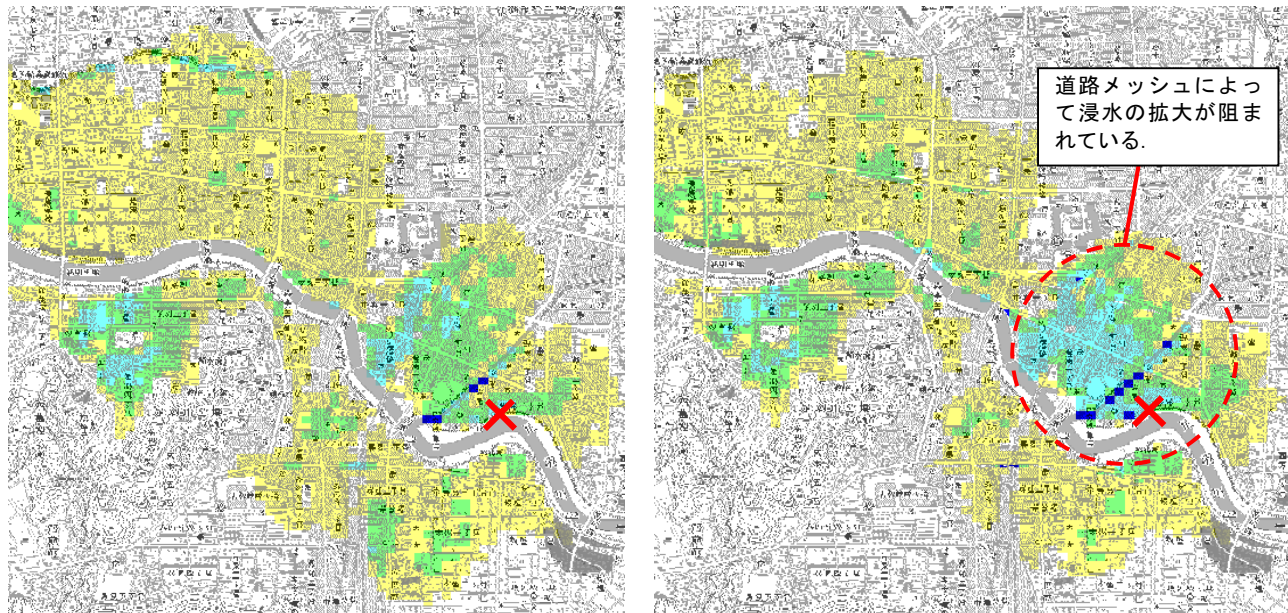


図 9.4.8 氾濫開始 40 分後の道路を考慮したときの浸水深の比較
（足羽川 5.0K 右岸破堤）

2)内水氾濫を考慮した氾濫解析結果

支川の氾濫や内水氾濫を考慮したモデルの影響を確認する。外水氾濫による被害の拡大の前に、内水氾濫や支川の氾濫が先に生じる可能性がある。このような氾濫は、外水氾濫時の避難ルートの確保、緊急輸送路の確保、水防活動における応急復旧時の運搬路の確保といった面で重要な情報を与えるものである。ここでは、九頭竜川 22.4K 右岸、日野川 9.4K 右岸が破堤した際に、支川モデルの追加することによる氾濫の違いについて比較する。なお、支川による排水や氾濫の影響を見るため、前述した堤内地の降雨による湛水は考慮していない。

九頭竜川 22.4K 右岸の破堤後の氾濫範囲と浸水深の比較を図 9.4.9 に示す。これによれば、支川を考慮しない場合、堤内地を拡大する氾濫流は河口付近まで広がるとともに、兵庫川を越えて拡大していることがわかる。一方で、兵庫川を考慮した場合、兵庫川右岸には九頭竜川の氾濫流が拡大していない。これは、氾濫水が支川に流入しているためで、内水河川の排水路としての役割を示す結果である。

つぎに、日野川 9.4K 右岸の破堤後の氾濫範囲と浸水深の比較を図 9.4.10 に示す。こちらの場合は、支川モデルありの計算結果の方が浸水エリア、浸水深ともに大きくなっている。これは、支川からの氾濫により浸水深が増加しているためで、内水氾濫を表現した結果である。

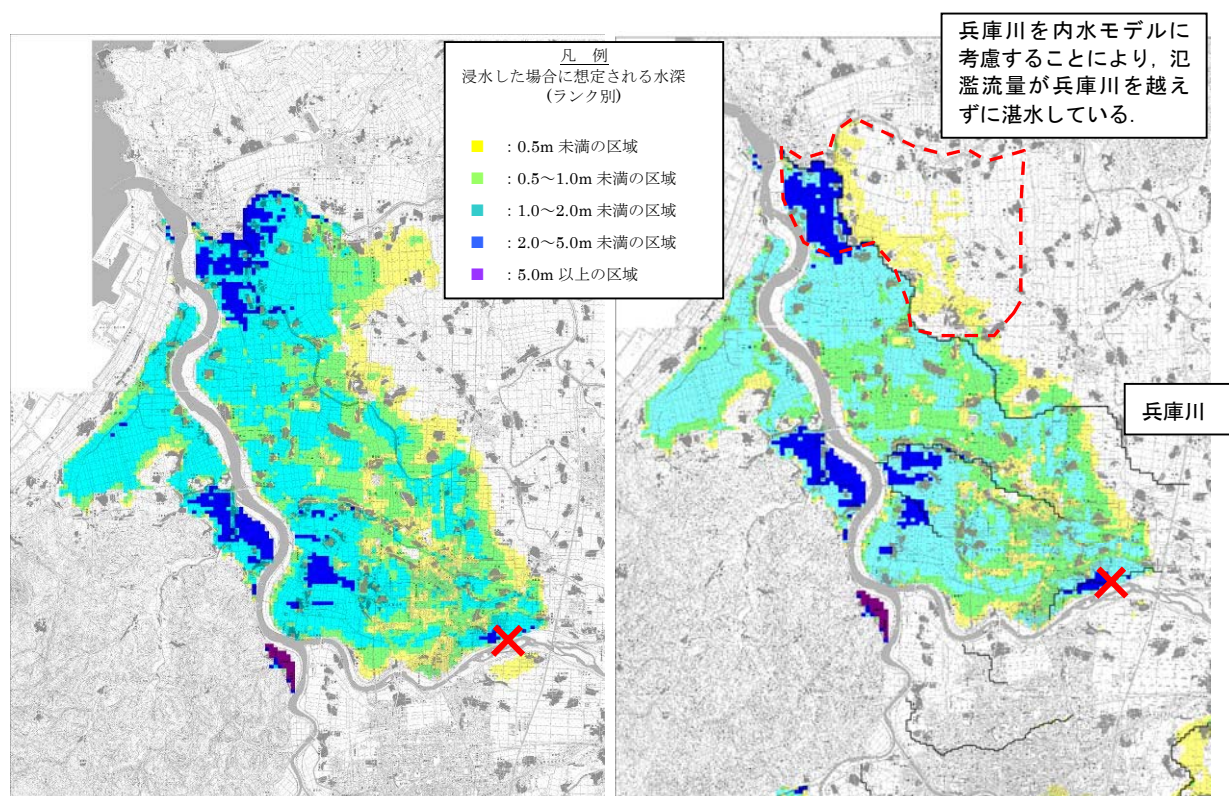


図 9.4.9 支川モデルの有無による浸水深の比較（九頭竜川 22.4K 右岸破堤）

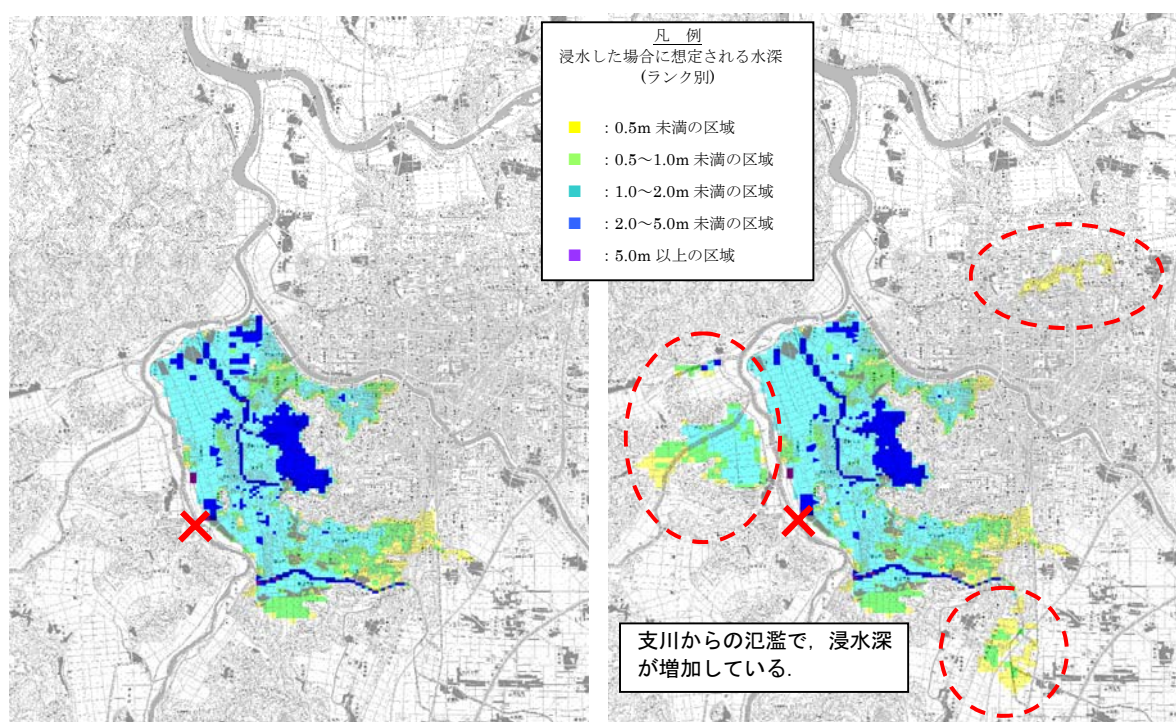


図 9.4.10 支川モデルの有無による浸水深の比較（日野川 9.4K 右岸破堤）

3) 堤内地の降雨・湛水モデル，支川氾濫・内水氾濫を考慮した氾濫解析結果

1)及び2)までのモデルと堤内地の降雨・湛水モデルを稼働させた場合の氾濫解析結果と浸水想定区域図との違いを比較する．雨量データは，レーダ雨量がないため，流出計算で用いた流域平均雨量を用いることとする．計算条件は，表 9.4.5 に示すとおりである．

表 9.4.5 計算条件

項目	洪水氾濫予測モデル（非構造モデル）
外力	1/150 規模を対象 各基準地点における対象洪水 布施田・中角：昭和 50 年 8 月洪水（1/150） 深 谷：昭和 51 年 9 月洪水(1/150) 三尾野：昭和 40 年 9 月洪水(1/150) 天神橋：昭和 51 年 9 月洪水(1/150)
河道	H19 年度測量横断（九頭竜川），H20 測量横断（日野川），激特河道（足羽川）
破堤地点	九頭竜川：22.4k 右岸 日野川：3.4k 右岸
出発水位	T.P.+0.56m（九頭竜川河口）
水路モデル	11 河川を対象にした．
メッシュの大きさ	100m×100m を基本とし，都市部においては 50m×50m に細分化する．さらに主要道路については，形状に合わせて細分化した．
降雨条件	流出計算時に使用した流域平均雨量を与える．
下水道	整備されている地域においては，考慮した．

これらの条件から、降雨・湛水過程や下水道整備を考慮した氾濫計算結果の違いを図9.4.11～図9.4.13に示す。図9.4.11によれば、流域全体の浸水を表現することが可能となり支川での自然排水の影響で浸水範囲の拡大が抑えられていることが理解される。一方で、降雨・湛水による浸水深は浅いものの、兵庫川右岸側のように広範囲にわたり、浸水が発生していることがわかる。これをより詳しく分析してみると、図9.4.12には降雨・湛水過程を考慮していないケースでは、このような浸水は発生していない。このことは、メッシュ毎に与えた超過確率150年相当の降雨が発生すると、広範囲に湛水が発生し、防災活動に支障が発生する可能性があることを示唆している。

また、図9.4.13に示すように、下水道をモデルに反映させることにより、内水モデルのみの結果に比べて、早期の湛水位の軽減や浸水解消を表現することが可能となる。

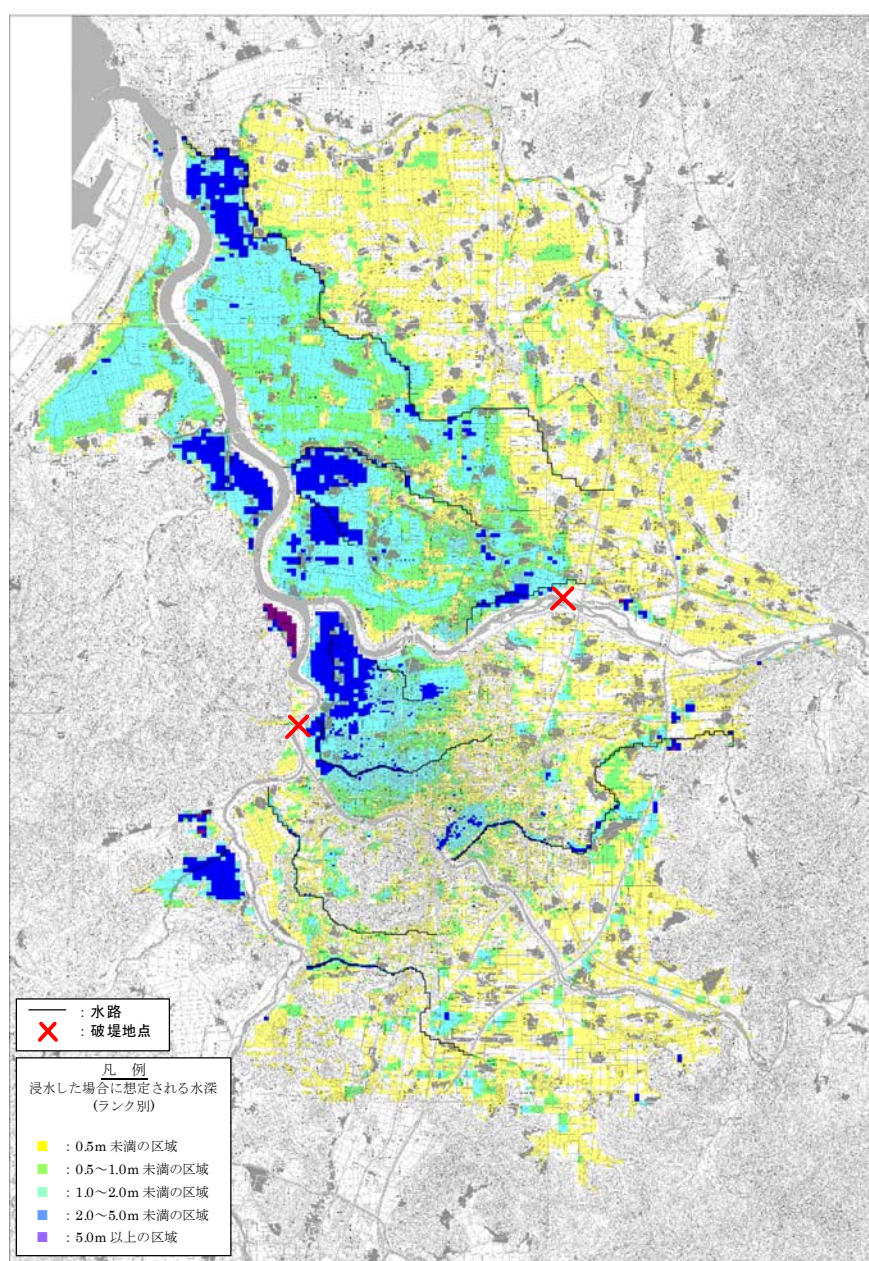


図 9.4.11 超過確率 150 年相当の洪水を想定した最大浸水深図

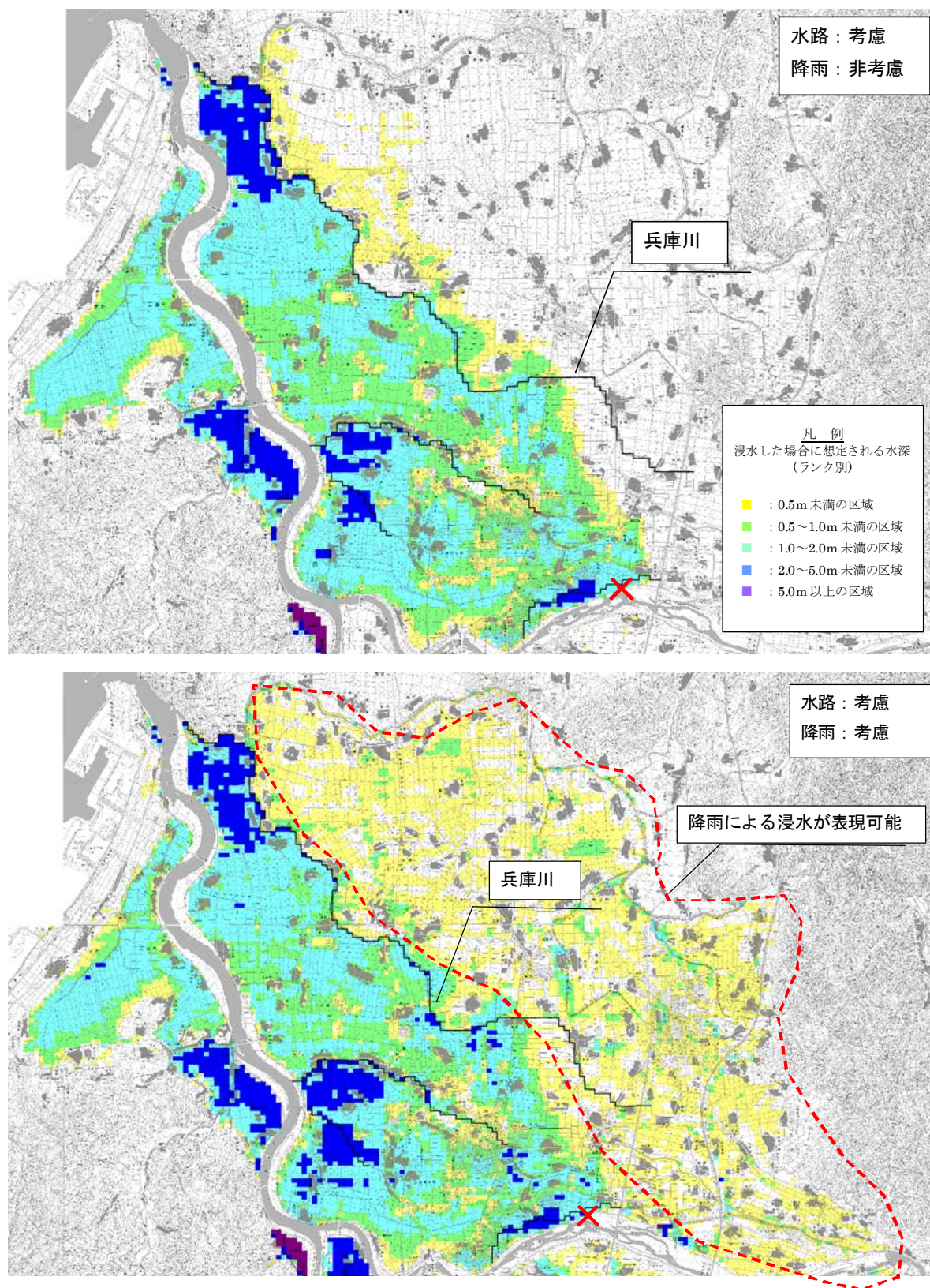


図 9.4.12 最大浸水深図（降雨考慮比較，九頭竜川 22.4k 右岸破堤）

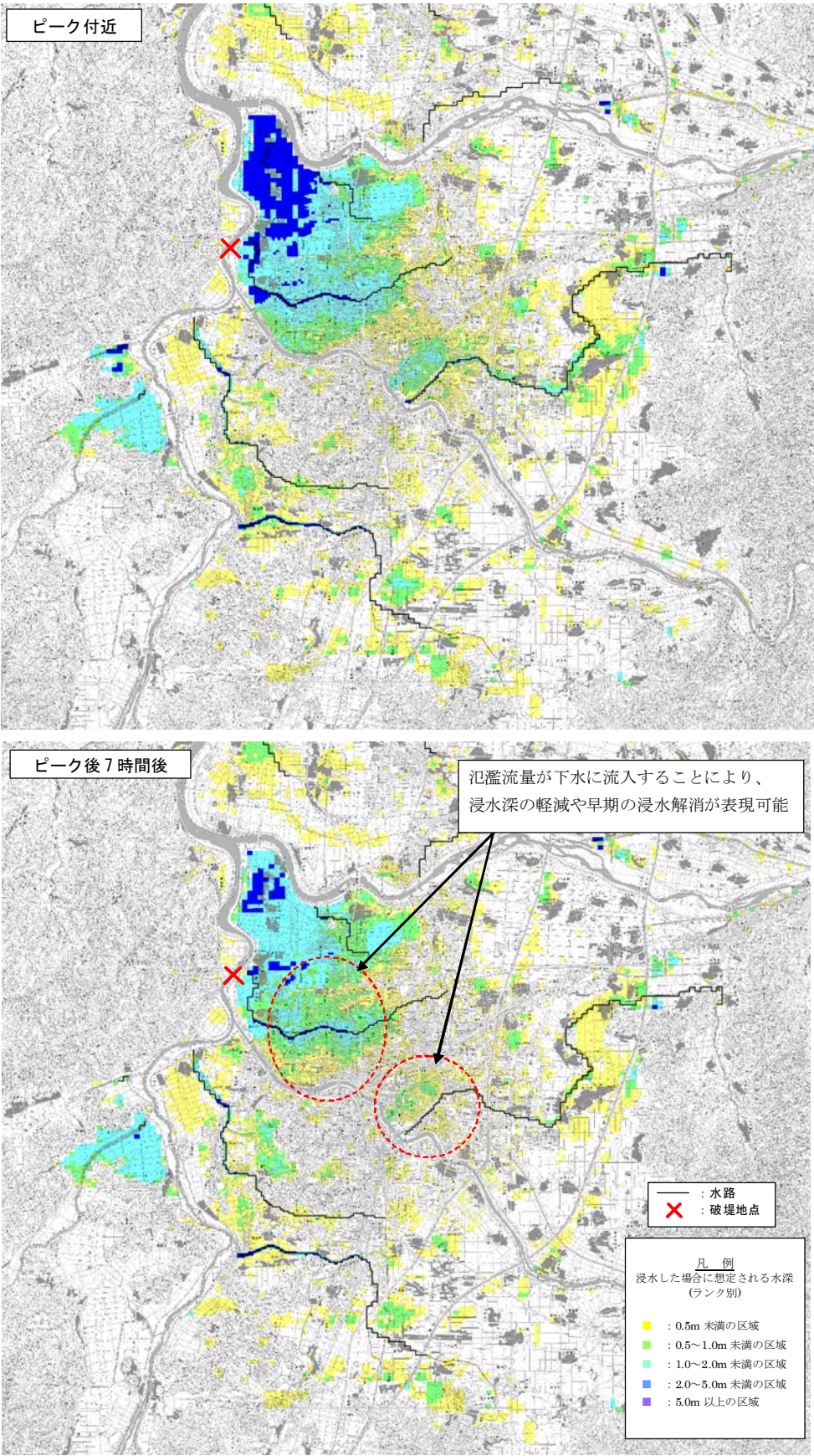


図 9.4.13 最大浸水深図（降雨考慮比較，日野川 3.4k 右岸破堤）

9.5 洪水氾濫予測システムの開発

9.5.1 システムの全体構成

九頭竜川流域洪水氾濫予測システムの設計・構築に際し、以下のことに留意したシステムとする必要がある。

- ・住民や市町村等への分かり易い情報配信を前提としたシステム
- ・実時間の浸水状況を、最新のデータをもとに迅速かつ精度良く予測できるシステム
- ・破堤などが生じる等、緊急時に利用するため、自動／手動計算が可能なシステム
- ・複雑な操作をできるだけ排除したシステム

当該地域は、平成 16 年に福井豪雨を経験し、内水被害を含めた浸水被害の危険性も高い地域である。このため、住民への情報配信までを想定した場合、内水氾濫を考慮しない外水氾濫結果のみでは、実時間での想定氾濫状況を初期とした解析が実施されているとは言えないため、内水氾濫を含めた解析を実施できるようにしたシステムとする。

次に、情報提供方法としては、一般に、Web 方式、クライアント／サーバ方式およびスタンドアローン方式の 3 つの方法が考えられる。本システムでは、これらの方法の中で、通常仕様時の汎用性・将来の拡張性にも優れた WEB 方式でモデルを構築する。

以上のシステム開発における基本的な考え方に下に、具体的なシステム構成としては、全体システムでの実現しうる機能を細分化し、有機的に機能するように、サブシステムを開発し、一連で自動的に動作する仕組みが必要となる。

本システムにおいては、大きく以下の 4 つの機能を有するサブシステム(もしくはプログラム)を作成し、これらを組み合わせて、全体システムを構築する。図 9.5.1 には、本システムの基本的な仕様を決定するために、サブシステムの常駐機能、河川管理者および一般利用者向けの機能、河川管理者に必要な機能をユースケースとして整理したものを示す。

この図から、各サブシステムの基本的な機能を以下のように設定した。

■自動計算

1. 「外部通信処理システム」は、外部システムから情報を受信する。
2. 「計算実行システム」は、"受信情報"をもとに計算を実行する。
3. 「外部通信処理システム」は、外部システムに"予測結果情報"を送信する。
4. 一般利用者は、「情報提供システム」で"予測結果情報"を確認する。

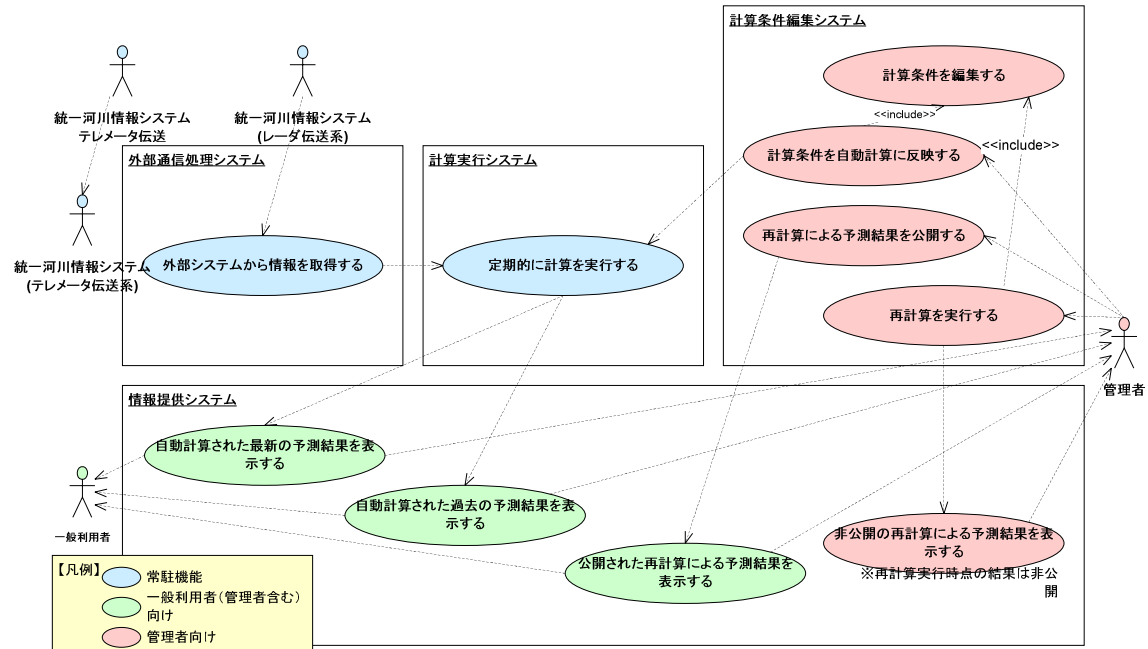
■再計算～計算結果公開の流れ

1. 管理者は、「計算条件編集システム」で"計算条件情報"を編集する。

2. 管理者は、「計算条件編集システム」で再計算を実行する。
3. 管理者は、「情報提供システム」で”予測結果情報”を確認する。
 - 3-1. (再度条件を編集する場合) 1. からやり直す。
 - 3-2. (計算結果を公開しない場合) 終了。
4. 管理者は、「計算条件編集システム」で”予測結果情報”を公開する。
5. 一般利用者は、「情報提供システム」で”予測結果情報”を確認する。

■自動計算の計算条件編集の流れ

1. 管理者は、「計算条件編集システム」で”計算条件情報”を編集する。
2. 管理者は、「計算条件編集システム」で再計算を実行する。
3. 管理者は、「情報提供システム」で”予測結果情報”を確認する。
 - 3-1. (再度条件を編集する場合) 1. からやり直す。
4. 管理者は、「計算条件編集システム」で”計算条件情報”を自動計算に反映する。
5. 「計算実行システム」は、反映された”計算条件情報”で計算を実行する。
6. 一般利用者は、「情報提供システム」で”予測結果情報”を確認する。



次に、図 9.5.2 には、本システムで扱うデータのライフサイクルを整理したものを示す。どのようにしてデータが進んでいき、処理・記録されていくかを分かりやすくしたようなものです。なお、図中の 2 本線はデータストアを意味し、四角囲みは、サブシステムがストアされたデータを共有する流れをわかりやすくしたものである。図 9.5.1 および図 9.5.2 からサブシステムの位置を定義した。この結果を図 9.5.3 に示す。

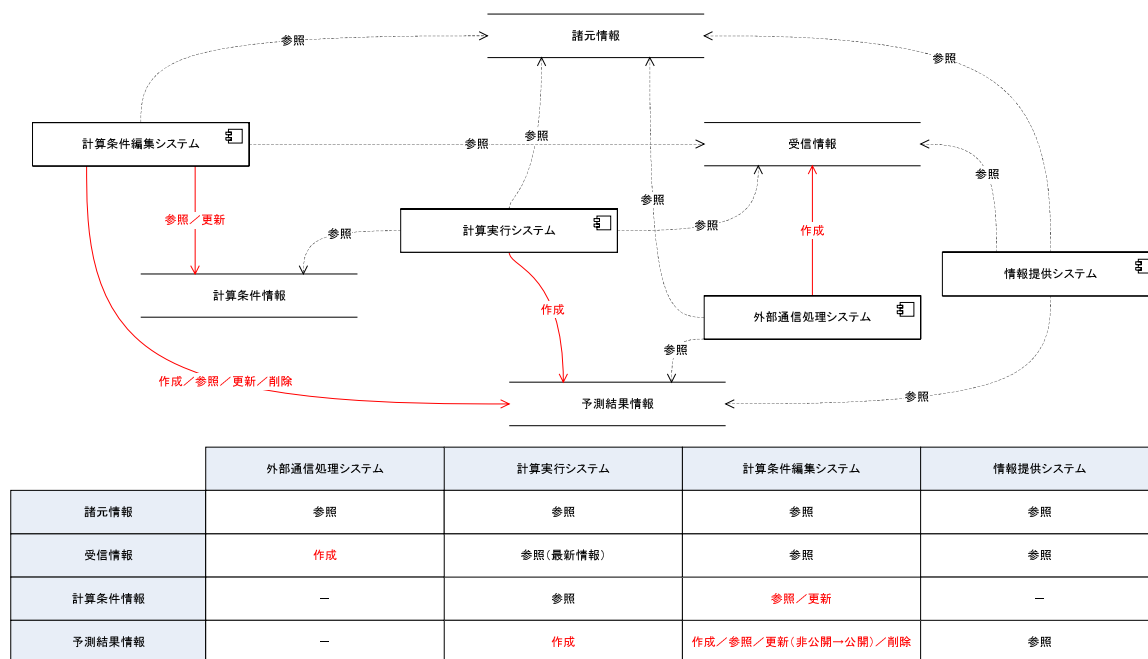


図 9.5.2 Data Flow Diagram によるデータのライフサイクルの定義

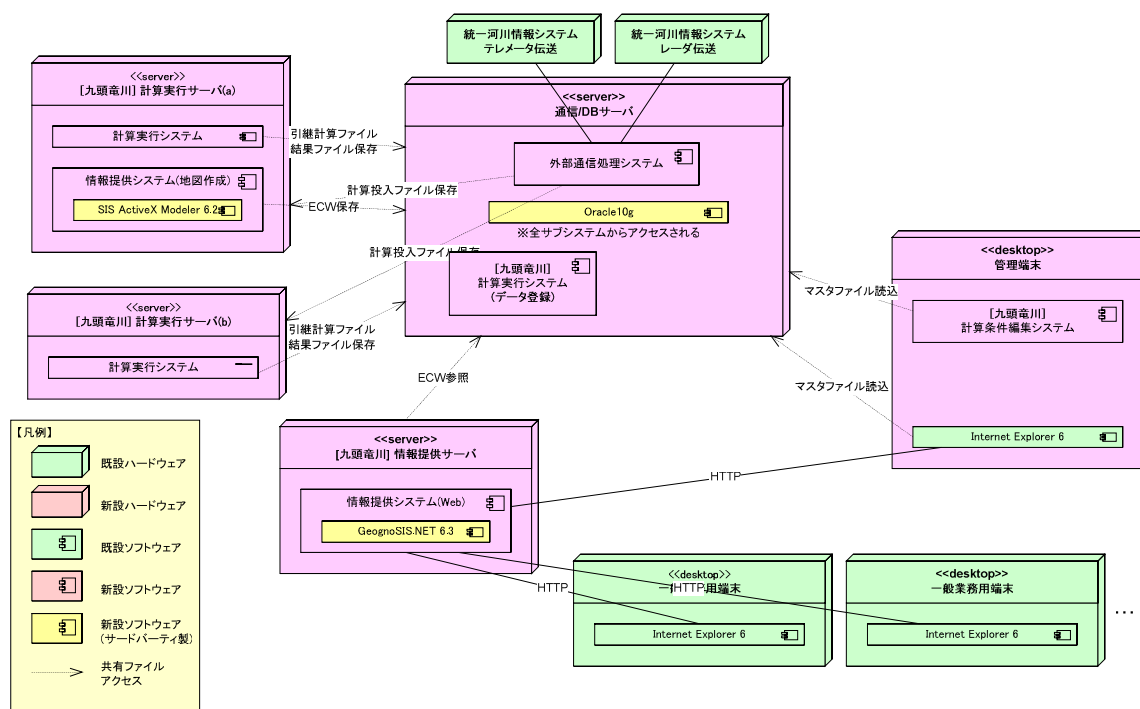


図 9.5.3 洪水氾濫予測システムにおけるサブシステムの位置の定義

- ①外部通信処理システム： 外部システムからのデータ入手・システム内の処理進行等を管理する。
- ②計算実行システム：リアルタイムでの計算実行処理を実施する。
- ③ユーザインターフェース：ユーザとシステム間の入力や出力等の情報伝達を行い、情報提供システムと条件編集システムで構成される。
- ④データベース：各種データを保存、管理する。

各サブシステムの機能は、表 9.5.1 に示す通りであり、図 9.5.4 に洪水氾濫予測システムの概略的な構成について示す。これによれば、外部システムから氾濫解析に必要なデータを取得した後、データベースに登録する仕組みとしている。このデータベースを中心にした、各サブシステムで演算等に必要データを取得し、結果を算出する仕組みであり、さらに演算した結果もデータベースに登録し、他のサブシステムでも利用可能にするシステムである。

表 9.5.1 リアルタイム浸水予測シミュレーションシステム サブシステム一覧

システム	サブシステム		主な機能
外部通信システム	統一河川情報システム		・実績 TM 観測データの収集 ・レーダメッシュ雨量データの収集
	洪水予測システム		・予測水位・流量計算
洪水氾濫予測シミュレーション・システム	外部通信処理システム		・データ収集機能 ・データ登録機能
	計算実行システム	解析部	・河道水位予測計算 ・はん濫予測計算
		処理部	・自動計算機能
	ユーザインターフェース	情報提供システム	①計算結果表示システム ・計算結果表示機能（最大・時系列） ②防災活動・避難行動支援システム ・浸水状況表示機能（地区、避難所等） ・道路冠水状況表示機能 ・避難経路・運搬経路の検索
		計算条件編集システム	・解析条件設定機能 ・手動計算条件設定機能 ・手動計算実行機能
	データベース		実績・予測水文データ，計算結果データ等を保存，管理する

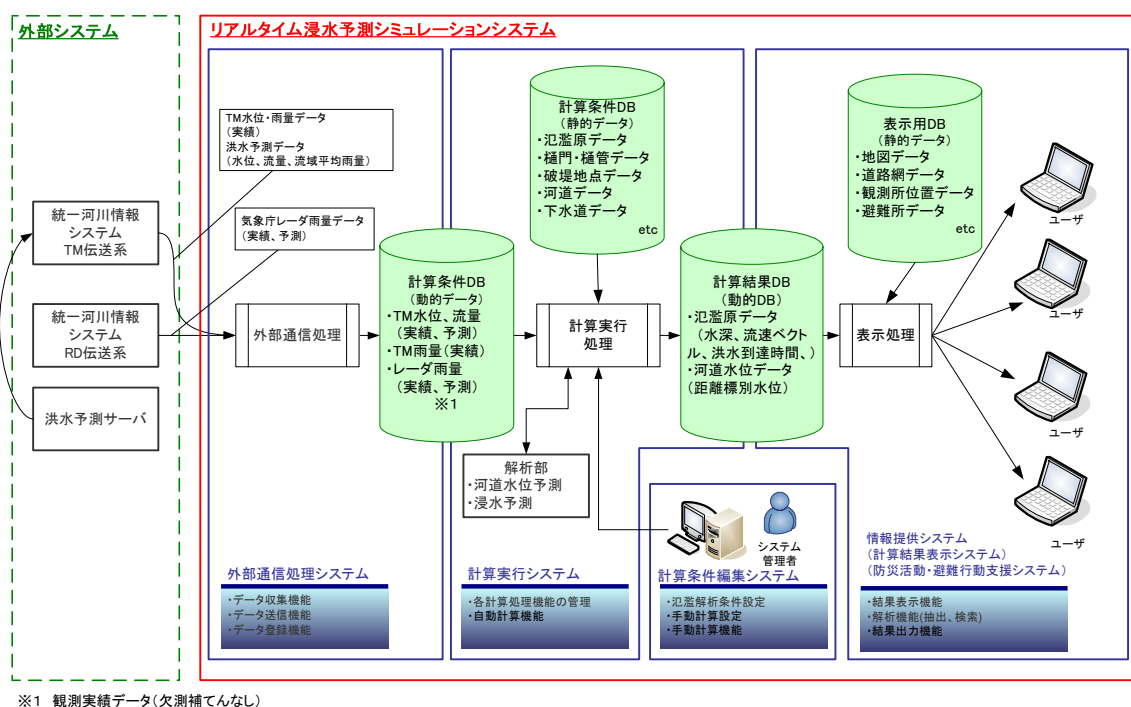


図 9.5.4 データベースを介在させたシステムの全体的な構成

9.5.2 外部通信システム

リアルタイム浸水予測シミュレーションは、基本的に外部のシステムから取得した実績・予測降雨データならびに河川水位・流量データ等を入力し、氾濫情報を出力する。このような計算プロセスの初期段階の入力データを取得する機能であるサブシステムが必要となる。そこで、このサブシステムの処理内容については、以下のように設定した。

①外部通信システムの基本機能

- ・外部システムのデータの更新状況を確認する。
- ・実績・予測降雨データを外部システムから入手する。
- ・河川水位・流量データを外部システムから入手する。
- ・入手したデータを Data Base に登録する。

②データを取得する外部システムと取得データの形式

統一河川情報システムからリアルタイムデータを取得する。

③データの保管先と保管方法

リアルタイム浸水予測システムが取得したデータは、データベースに登録される。なお、これらのデータは、図 9.5.4 中の逐次計算・更新されるデータであるため、動的なデータとして定義する。一方で、流域内の河川断面等、堤内地内の資産等といった固定したデータを、静的なデータとして定義した。ここでは、動的なデータをデータベースに登録する。

(1) 降雨データ

実績・予測降雨データに関しては、統一河川情報システムから表 9.5.2 に示すデータを取得する。

表 9.5.2 実績・予測降雨データの提供システム

データ内容	データ提供システム	データ更新	予測時間	予測結果出力間隔
実績テレメータ	統一河川 TM 伝送系	10 分間隔	—	—
流域平均雨量	洪水予測システム データ取得は統一 TM 系経由	1 時間間隔	6 時間先	1 時間間隔
全国合成レーダ (国交省：現況)	統一河川 RD 伝送系	5 分間隔	—	—
移動解析レーダ (国交省：予測)	統一河川 RD 伝送系	10 分間隔	3 時間先	10 分間隔
統合プロダクト (気象庁：現況)	統一河川 RD 伝送系	10 分間隔	—	—
ナウキャスト (気象庁：現況)	統一河川 RD 伝送系	10 分間隔	1 時間先	10 分間隔
降水短時間予報 (気象庁：現況)	統一河川 RD 伝送系	30 分間隔	6 時間	10 分間隔

(2) 河川水位・流量データ

システムで利用する河川水位・流量データに関しては、表 9.5.3 に示す現状のシステム構成より下記のシステムから入手するものとする。

表 9.5.3 河川水位・流量データの提供システム

データ内容	データ提供システム	データ更新	予測時間	予測結果出力間隔
実績データ	統一河川 TM 伝送系	10 分間隔	—	—
予測データ	洪水予測システム データ取得は統一 TM 系経由	1 時間間隔	6 時間	1 時間間隔

※TM：テレメータの略，マイクロ回線でデータを定期的に収集する。

(3) 外部通信システムの設計

九頭竜川氾濫予測システムに必要なデータは、すべて統一河川情報システムから伝送される。この伝送仕様については、統一河川情報システムテレメータ伝送手順³⁰⁾に従いプログラムを作成した。図9.5.5には、外通信システムのデータ処理フローを示す。

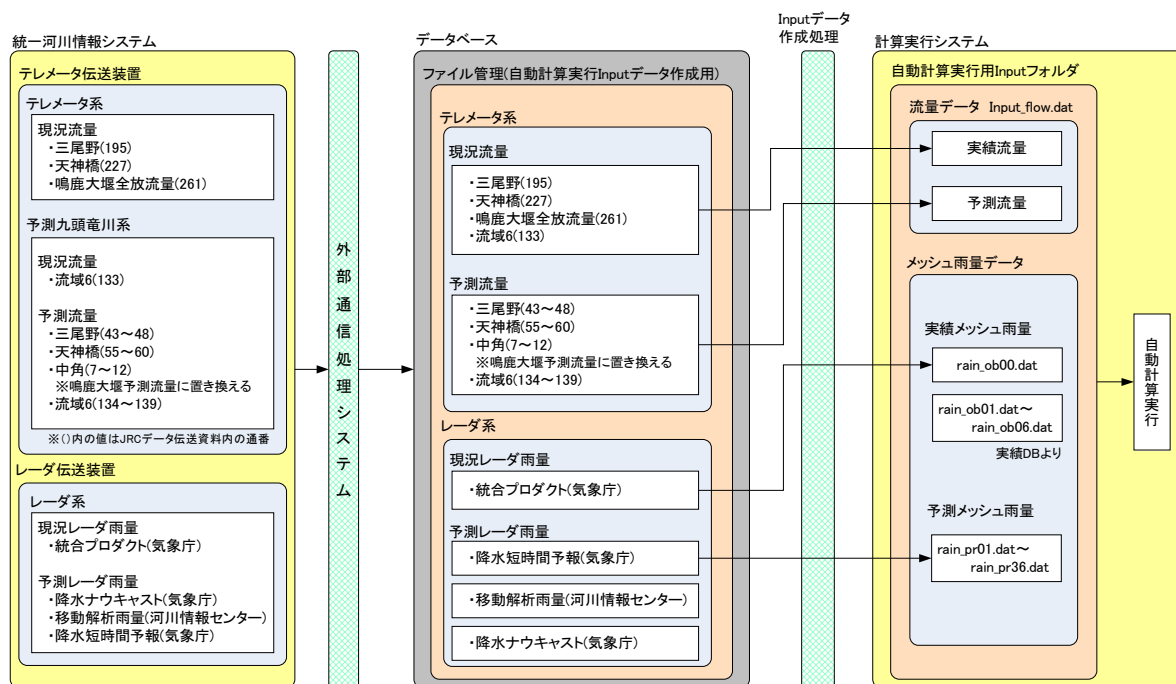


図 9.5.5 統一河川情報システムからの必要なデータを取得し、Data Baseに登録するための外部通信システムのデータ処理フロー

9.5.3 計算実行システム（氾濫解析実行システム）

(1) 自動計算のスケジュール管理

本システムのリアルタイム計算実行にあたっては、洪水予測システムの計算結果、および気象庁からのレーダ雨量を利用する。

本システムは、洪水時における災害時に浸水範囲を予測し、市町の迅速な防災活動に活用するために重要である。そのためには、本システムの計算実行システムでは、データ取得から自動演算処理を経て、結果を表示することが必要となる。しかしながら、システムの運用上、通信障害等で一部データ等が発生した場合に、システムが停止する可能性は否定できない。そこで、欠測補てんを実施し、できるだけ計算が停止しないようにすることとした。図9.5.6には、入手可能なデータをもとにリアルタイム計算実行を実施するための欠測処理フローを示す。これにもとづき外部通信システムのタスク管理を実施するようにした。さらに、図9.5.7および図9.5.8には、実際の演算処理タイミングを示す。この演算スケジュールに従い、定時に入力データを取得し、演算を行うタスクを設定した。



図 9.5.6 リアルタイム計算実行フロー

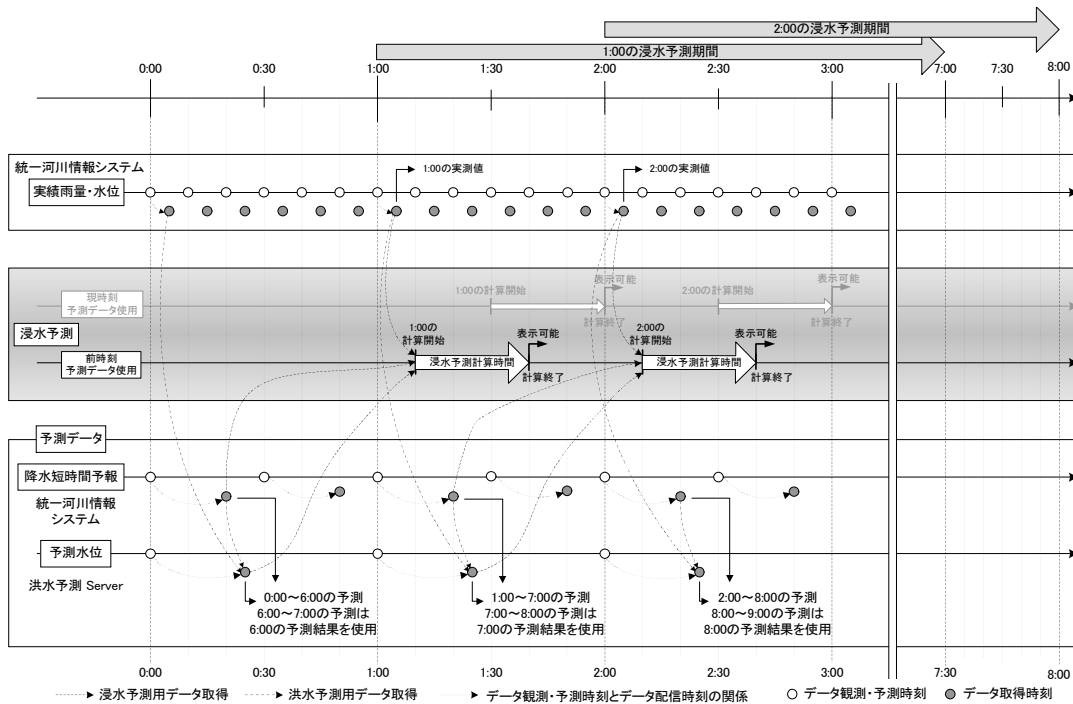


図 9.5.7 洪水予測システムが正常に稼動している場合の演算スケジュール

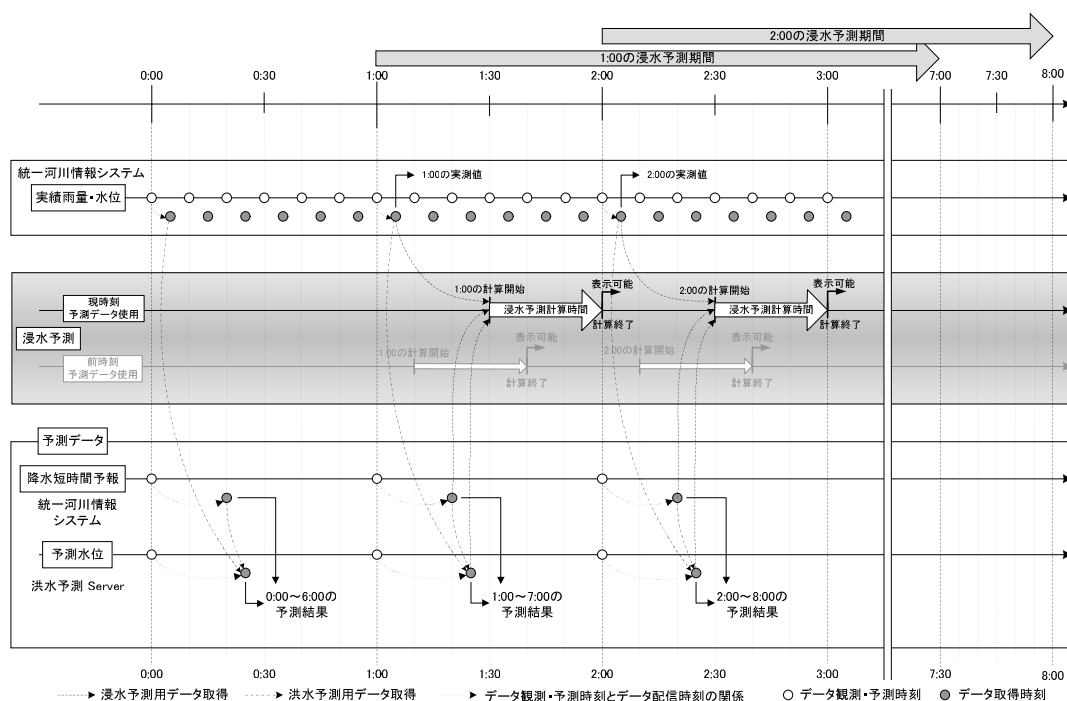


図 9.5.8 洪水予測システム結果が欠測している場合の演算スケジュール

(2) 氾濫解析の実行

氾濫解析は図 9.5.9 に示すフローに従って実行される。図中には、氾濫モデルの検証で設定した溢水・破堤条件を同一にし、リアルタイムでの氾濫予測を実施するフローとなっている。

(3) 引継ぎ計算の実行

氾濫解析では、計算の安定化を図るために、降雨の始めからのハイドログラフを用いて河道水理計算と氾濫原水理計算を行っている。リアルタイム氾濫予測で同様のことを適用すると、降雨の始めから現時刻までの実績データに基づく計算を繰り返し行うこととなり、時間の経過とともに計算期間が長くなるという演算時間の問題が生じる。

このため、実績データに基づく計算を繰り返し行わないように、図 9.5.10 に示すように、常に現時刻より 1 ステップ前

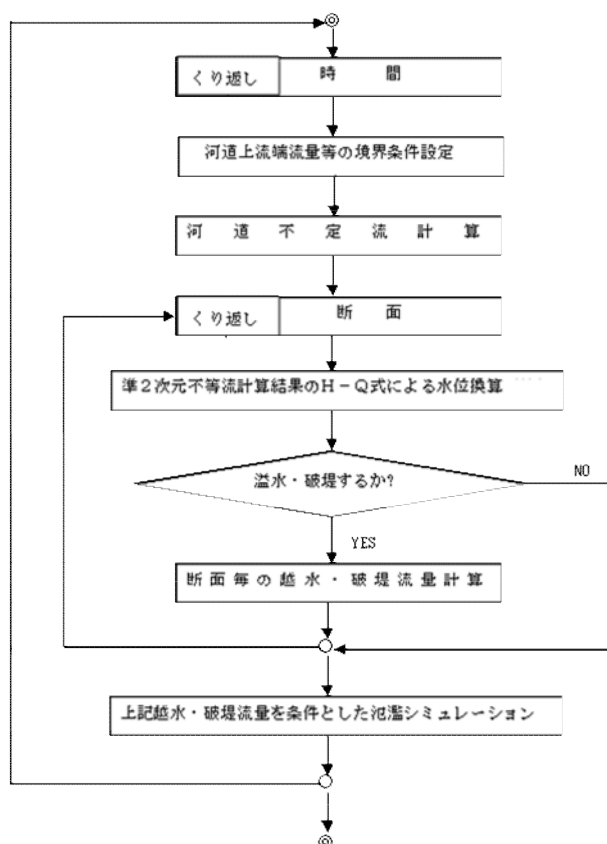
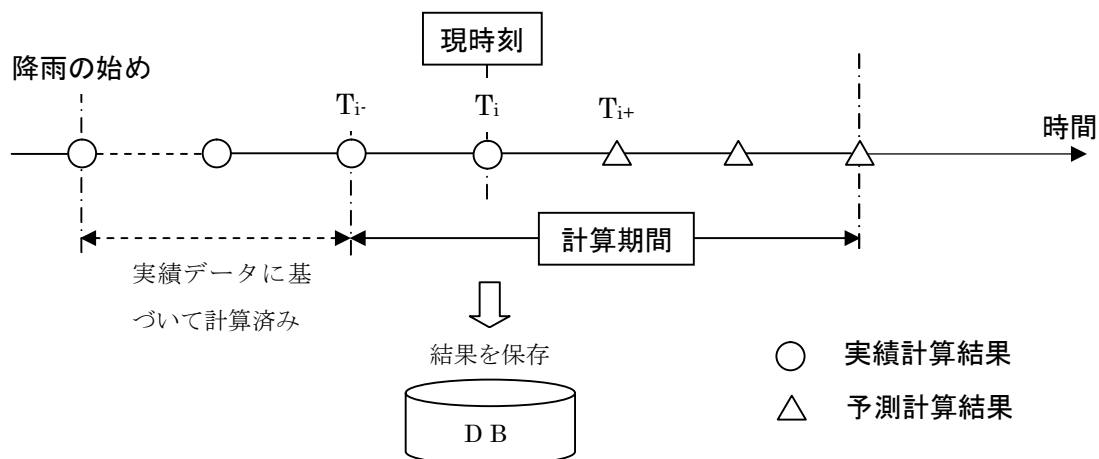


図 9.5.9 氾濫解析の実行フロー

の時刻の計算結果を初期値として予測計算を行うものとする．これにより，計算期間は一定となる．本システムでは，このような，対処を行うことで演算時間を短くする方法を適用した．

① 現時刻 T_i の計算



② 時刻の更新

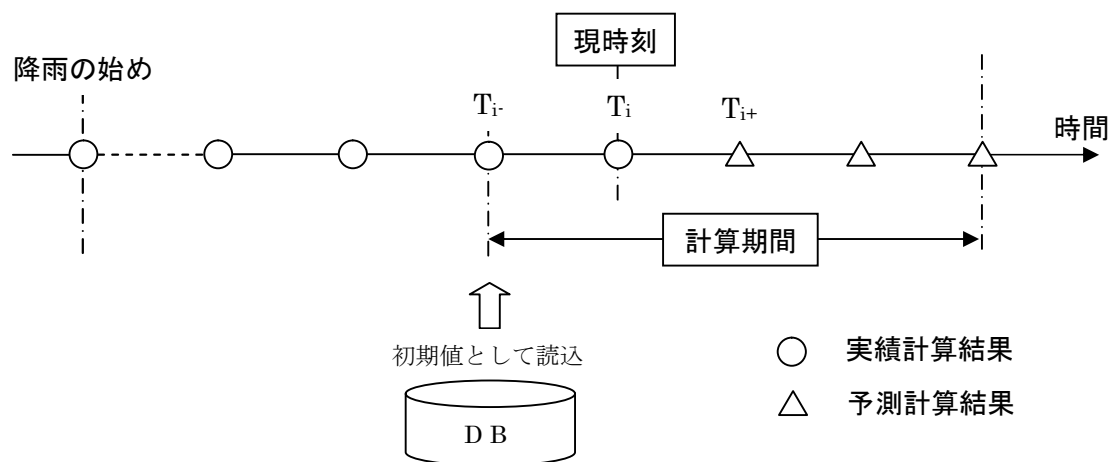


図 9.5.10 引継ぎ計算の模式図

9.5.4 計算条件編集システム（破堤開始時点からの氾濫予測解析）

本システムで導入するリアルタイム計算では、洪水発生時に時々刻々と変化する細かな情報に自動で対応することは、現実的に不可能である。例えば、以下のような状況が考えられる。

- ・洪水予測システムが停止しているが計算を実行して氾濫状況を確認したい。
- ・任意地点を決壊させて計算を実施したい。
- ・計算で設定されている決壊開始水位以下の条件で、決壊が生じており、現状を踏まえた計算を実施したい。
- ・堤防嵩上げを実施したので堤防天端高を高くしたとき、氾濫がどうなるのかを知りたい。

条件編集システムはこれらの状況をオフライン計算（手動計算）することで、リアルタイムでの氾濫結果を補完していくためのサブシステムである。

このようなサブシステムが必要であるが、これらの処理を実施するためには、再計算を実施するためのサーバが必要となり、複数ユーザが同時に実施することはサーバの台数を増やすことに繋がり、実質困難である。そこで、計算条件編集システムは、管理ユーザのみが利用できる機能とした。なお、サブシステムの機能は、福井河川国道事務所の職員の要望を踏まえて、以下の機能を設計・構築した。すなわち、任意境界条件による手動計算機能、リアルタイム計算結果を利用した手動再計算機能、および計算条件のメンテナンス機能により、サブシステムを構成した。図 9.5.11 には、本サブシステムのメニュー選択画面を示す。この中で、手動計算の結果を公表するか否かについては、事務所の判断が必要であり、その機能はシステムに担保した。もし、公表する場合は、その結果が WEB GIS 上に表示することが可能となる。さらに、図 9.5.12 には図 9.5.11 で選択したメニューの以降の画面の遷移を示す。

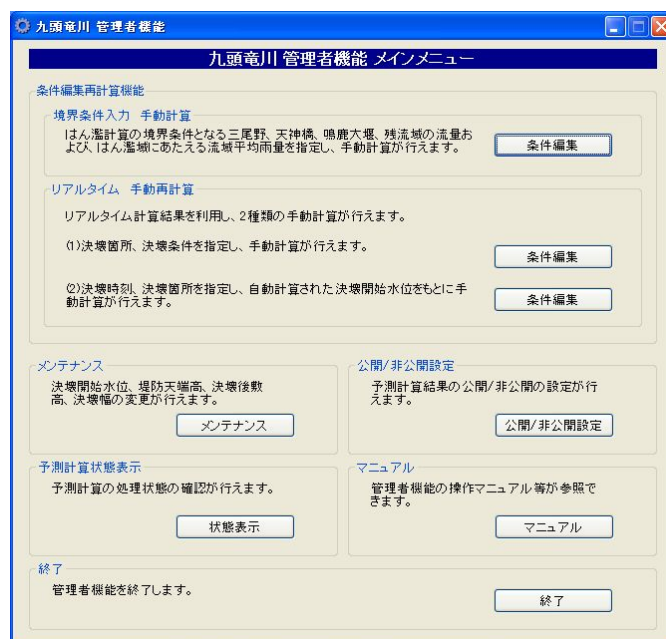


図 9.5.11 計算条件編集システムのメニュー選択画面

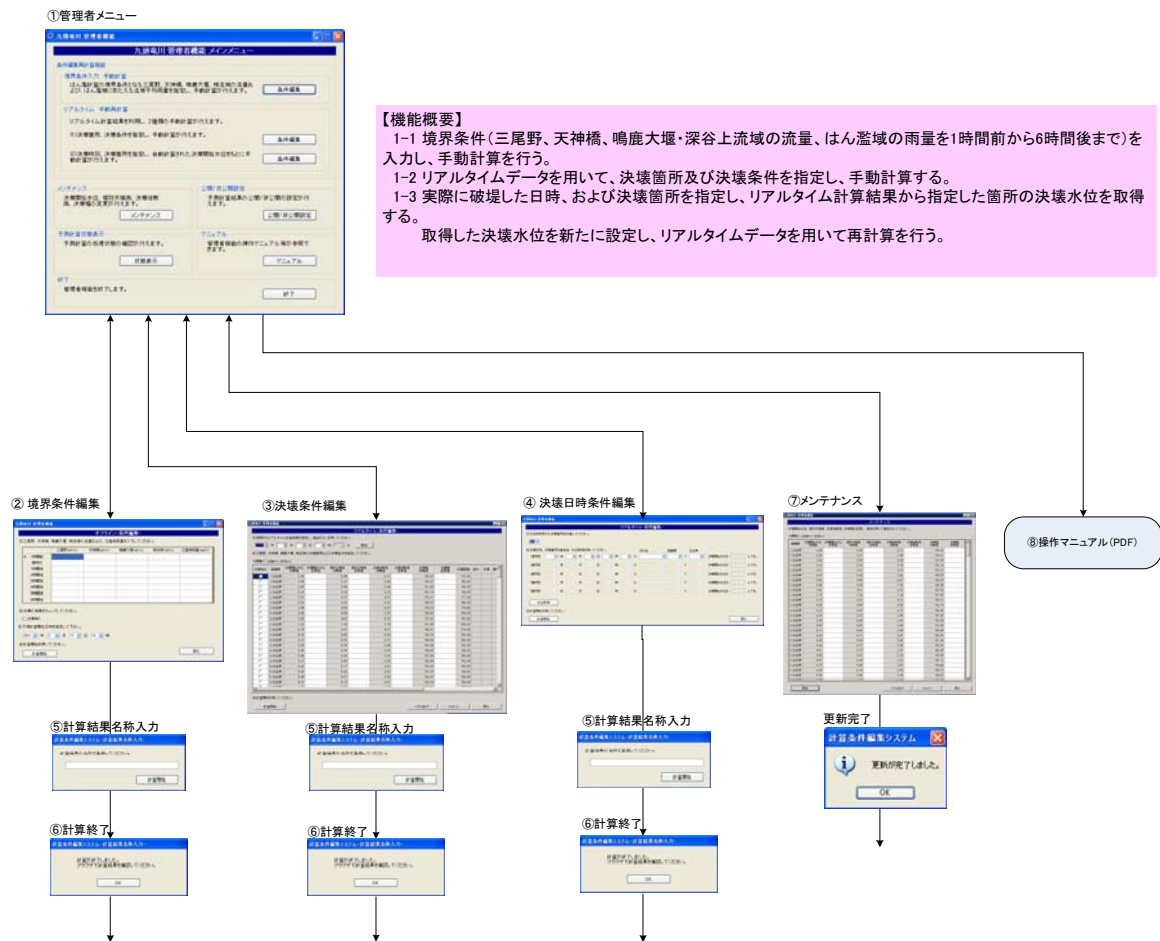


図 9.5.12 計算条件編集システムの画面遷移

(1) 任意境界条件による手動計算機能

本機能は、図 9.5.13 に示すように、氾濫計算の境界条件となる三尾野、天神橋、鳴鹿大堰・深谷上流域の流量および、氾濫域にあたる流域平均雨量を手入力し、洪水流量、河道内水位の計算を実施し、氾濫解析の実施を支援するものである。なお、手順は以下の通りである。

- ①氾濫計算の境界条件となる 3 地点の流量と堤内地雨量を手入力する。
- ②条件を確認し、計算を実行する。なお、決壊の有無も選択可能である。
- ③計算結果は非公開用として、表示さ

九頭竜川 管理者機能

オフライン-条件編集-

① 三尾野、天神橋、鳴鹿大堰、残流域の流量および、氾濫域雨量を入力してください。

	三尾野(m3/s)	天神橋(m3/s)	鳴鹿大堰(m3/s)	残流域(m3/s)	氾濫域雨量(mm/h)
1時間前					
現時刻					
1時間後					
2時間後					
3時間後					
4時間後					
5時間後					
6時間後					

② 決壊の有無をチェックしてください。

☐ 決壊有り

③ 予測計算開始日時を指定して下さい。

2010 年 3 月 16 日 16 時

④ 計算開始を押してください。

計算開始

戻る

図 9.5.13 任意境界条件での手動計算

れる。

- ④計算結果を公開用として登録すれば、一般ユーザ、例えば事務所内の管理者以外の職員や市町の防災担当者なども閲覧することが可能となる。

(2) リアルタイム計算結果を利用した手動再計算機能

本機能は、決壊状況等に対応するために設ける手動再計算機能である。本システムにおいては、リアルタイムでの計算として、以下の2ケースの計算を実施する。

- ・決壊なし計算：河川からの越水のみを考慮した計算
- ・決壊有り計算：河川水位が決壊開始水位を超えた地点は、全て決壊させた計算

上記の計算ケースを踏まえ、現実の決壊を考慮した計算を実施する場合、下記のような条件で計算ができることが必要となる。

- ①決壊箇所と決壊条件を編集して、任意地点での決壊計算を実施する機能
- ②決壊開始水位に達する前に決壊が生じ氾濫が発生した時に、計算開始時刻を指定して、決壊箇所等の条件を変更して手動計算する機能

上記の計算を実行するために、①および②に対する手順に従い、計算を実行できる画面を設計・構築した。

1)決壊箇所と決壊条件を編集して、任意地点での決壊計算を実施する機能

まず、手動計算を実施するため自動計算結果を選択し、その時の氾濫状況を表示する。次に、決壊条件を変更する地点を選択し、任意地点での決壊氾濫計算を実行する。



図 9.5.14 任意地点での決壊計算を実施する機能のインターフェイス

2) 計算開始時刻を指定して、決壊箇所等の条件を変更して手動計算する機能

本機能は、図 9.5.15 に示す本システムで設定している決壊開始水位より低い水位で実際に決壊が生じているような場合を想定して構築した機能である。例えば、下記のようにリアルタイム計算では計算上は 2 時間後に決壊となっているが、実現象として既に決壊が発生している場合である。

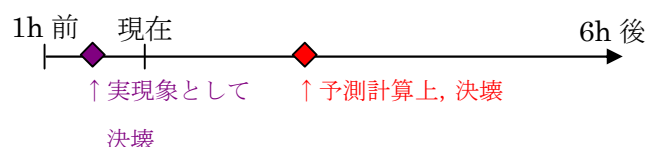


図 9.5.15 リアルタイム計算と実現象の相違例

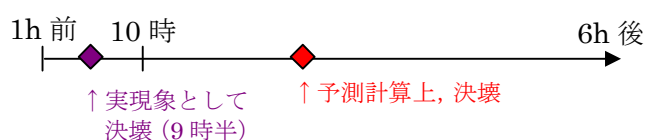
この場合、リアルタイム計算への決壊条件を含めた計算は困難である。また、現時刻において、決壊が生じている様な状況では、災害対応で時間的余裕もない中で氾濫状況等を迅速に把握する必要がある。

そこで、本システムにおいては、決壊が生じたと想定される時刻および決壊地点を入力することで自動的に計算する方法とする。

具体的な手順は下記のとおりである。

- ①決壊が生じた時刻と決壊が発生した地点を選択する。
- ②決壊が生じている直前の時刻を計算開始時刻とする。（計算データが存在しない場合には、5 時間先までさかのぼり、データが存在した時点を計算開始時刻として計算する：例えば、図 9.5.16 に示す現時刻が 9 時半に決壊が発生した場合は、9 時を計算開始時刻とする。9 時のデータがなければ、8 時、7 時とさかのぼる）

●現時刻（10 時）での状況



●手動再計算時刻の指定イメージ



図 9.5.16 実際に堤防の決壊が発生した場合を想定した計算条件の設定イメージ

3) 決壊開始水位を決壊時刻と既往の計算結果より内挿して求める。

4) 上記条件で決壊氾濫計算を実施する。

【■具体例：決壊時刻を指定した手動計算】

図 9.5.17 は、決壊時刻を指定する入力画面を示す。この画面の操作手順としては、以下の 1)～4)に示す通りである。

図 9.5.17 決壊時刻を指定するための入力画面

- 1)実際に決壊した時刻を分単位で選択可能とする。
- 2)決壊箇所数を複数とした場合の読み込む過去のリアルタイム氾濫予測は、最初の決壊時刻直前の時刻のリアルタイム氾濫予測結果を入力する。
- (例)3 箇所選択の場合

1 箇所目 2009 年 7 月 11 日 13 時 39 分
 2 箇所目 2009 年 7 月 11 日 12 時 24 分
 3 箇所目 2009 年 7 月 11 日 13 時 55 分

2 箇所目の時刻 12 時 24 分が最初の決壊時刻となるので、その直前の時刻の自動計算結果である 2009 年 7 月 11 日 12 時 00 分のデータを読み込み、決壊開始水位の取得、再計算を実施する。

3)決壊開始水位の取得

氾濫予測計算では各河道断面の水位予測が 30 分間隔で出力される。指定した決壊開始時刻前後の河道水位計算結果より、内挿で指定した時刻の決壊開始水位を求める。

(例)12 時 24 分を決壊開始時刻に指定した場合

12 時 00 分と 12 時 30 分の河道水位計算結果より、指定した断面(河川、距離標)の水位を基に内挿し、指定時刻の水位を求め、それを指定した時刻の決壊開始時刻とする。

- 4)指定した決壊箇所の決壊開始水位を編集し、再計算を実施する。

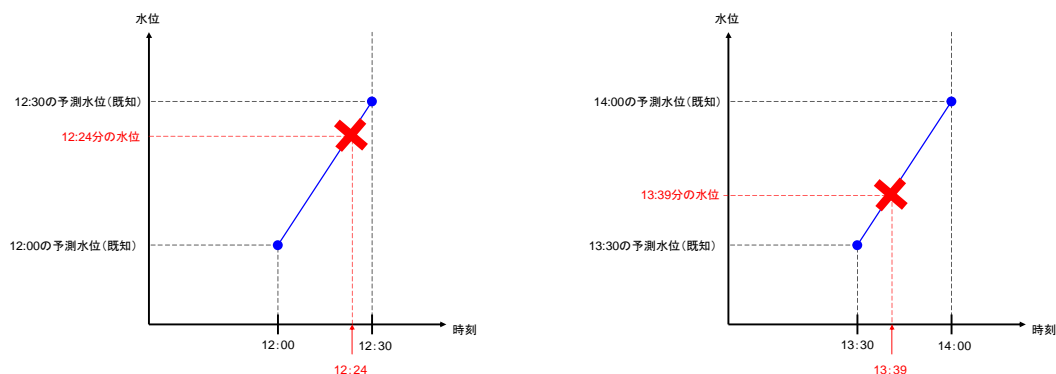


図 9.5.18 決壊開始水位を決壊時刻とそれまでの計算結果から内挿

9.5.5 情報提供システム

(1) 計算結果表示内容

本システムでは、計算結果と参考なる情報を表示する機能を設計・構築した。情報提供システムで表示する内容は、以下の通りである。

1) 計算結果の表示

- ・ 想定決壊地点・越水地点
- ・ はん濫原の浸水深および浸水範囲（時系列と最大）
- ・ 氾濫水の流速（時系列と最大）
- ・ 流速と水深の関係から求まる危険度（時系列と最大）
- ・ 任意地点（メッシュ）の浸水深の時間変化（グラフ）
- ・ 河道水位縦断図
- ・ 堤内地内の地形と浸水深の横断図

2) 防災活動・避難行動支援情報

- ・ 主要施設の浸水状況
- ・ 地区別の浸水状況
- ・ 道路浸水状況
- ・ 避難ルートの表示

(2) 画面の基本構成

前項の Web 画面を設計するにあたり、全体の共通的な構成を決める必要がある。図 9.5.19 には、設計構築した画面の構成について概説する。この画面は、GIS での浸水範囲等を表示することを前提としたものであり、図中①のタブで、リアルタイムでの氾濫予測結果、過去の予測結果、条件編集予測結果および管理者メニューを切り替えて操作できるようにしている。この画面構成は、洪水予警報業務における手順に応じたメニューの並びとしており、まず状況確認のためのリアルタイムの氾濫予測結果、過去の予測結果を確認する。その次に、破堤が発生した場合を想定し、自動計算結果を利用した手動計算による氾濫予測結果を表示することとした。さらに、手動計算の必要性は、九頭竜川の氾濫は経験上一度もなく、今後も頻度的には低いものと考えられるため、一番右側に配置した。図中①にマウスを置くと、タブメニューの階層下にある②に示すサブメニューが表示される。この理由として、GIS 画面を狭くしないように配慮した設計とした。

図中③、④および⑤は、九頭竜川の氾濫原は広いため、浸水初期の段階において GIS 上を目視で探索することは困難である。そこで、予測結果を利用して内外水氾濫の発生予測、河川からの越水、決壊を予測しているかを画面情報に赤く表示するようにした。

つぎに、画面右側には、堤内地の基図の種類、基盤情報、観測所、避難所、アンダーパスなどの水災時に危険となる箇所の表示選択に加え、予測計算時間内の浸水情報の表示を選択できるようにしている。これにより、必要な情報を組み合わせ、浸水情報をマ

ップとして整理することで、データの利用目的に応じた表示を職員が選択できるように構成した。

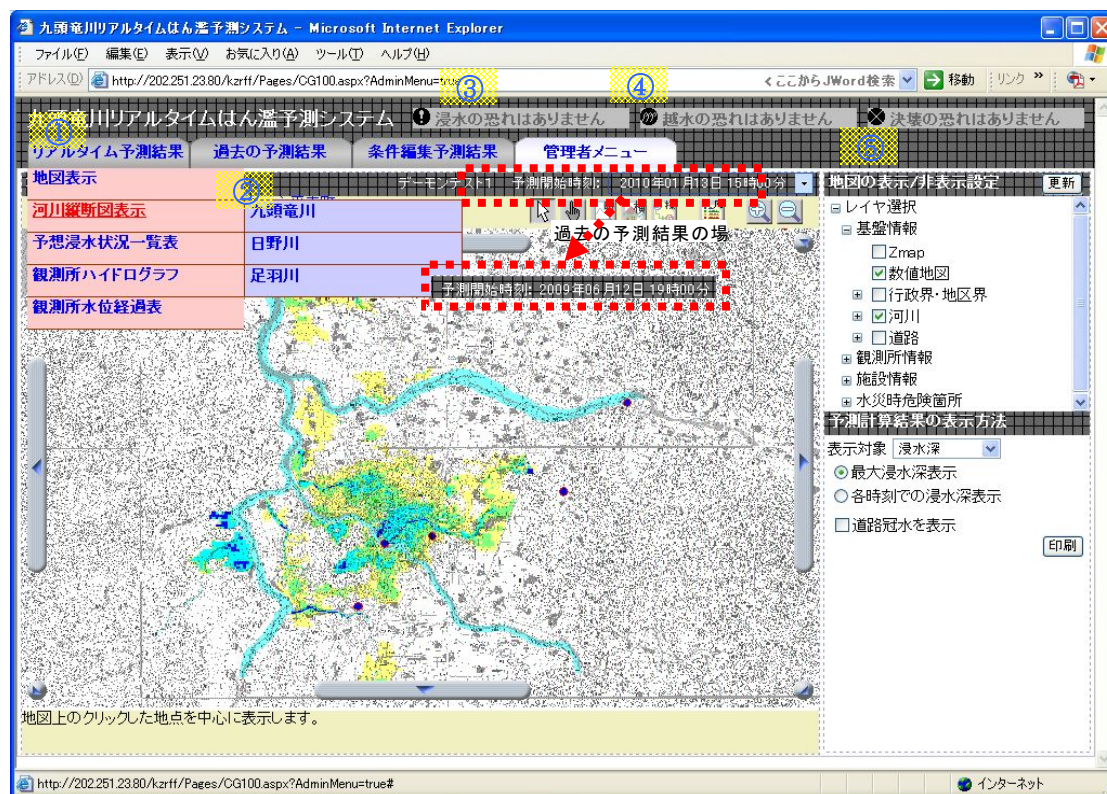


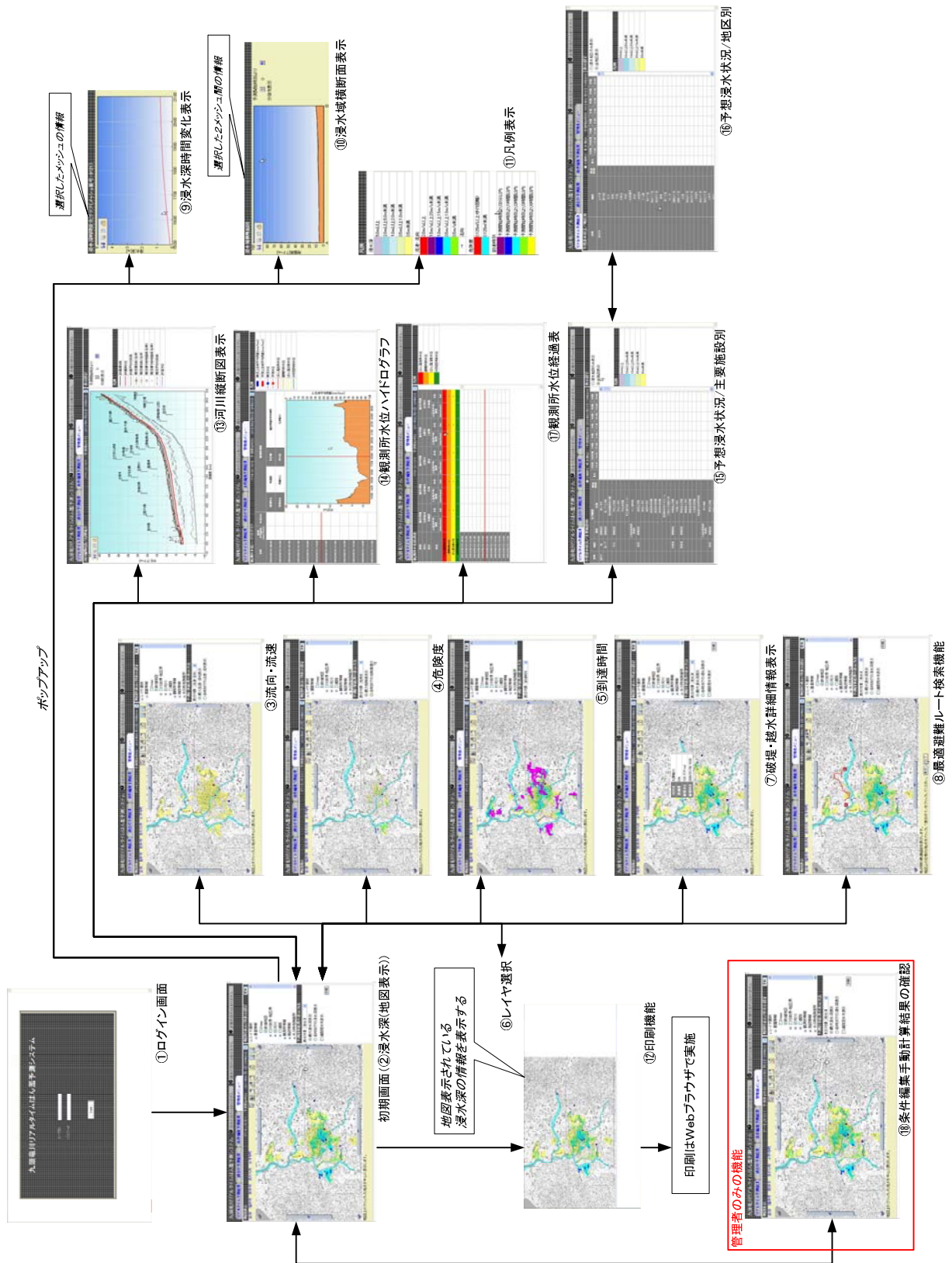
図 9.5.19 Web GIS を基本とした画面構成

基本構成に基づき、前項の表示内容を GIS 上で表示するために、データベースと連携したシステムとした。これらの表示画面の遷移を図 9.5.20 に示す。

地図上では、地形図や主要施設、道路網と計算結果を重ね合わせて表示できる機能とした（図 9.5.20 中②～⑤）。溢水や破堤が想定されるその地点は、その詳細情報をポップアップにより確認できるようにした（図 9.5.20 中⑥）。また、避難ルート検索は、地図上から始点と終点を選択し、検索結果は、浸水深図や背景地図と比較して確認ができるように配慮した（図 9.5.20 中⑦）。

グラフ形式では、選択した地点の浸水状況（図 9.5.20 中⑧）や、堤内地間の横断的な浸水状況（図 9.5.20 中⑨）、河道水位の計算状況（図 9.5.20 中⑩）および水位予測観測所の予測結果を確認できる画面を開発した（図 9.5.20 中⑪）。

浸水の恐れがある地区や地域を容易に把握することを目的として、地区や避難所や主要施設で浸水の恐れがある箇所を抽出して、表形式で表示できる機能を開発した。（図 9.5.20 中⑫、⑬）。また、水位観測所のデータは表形式でも確認できるようにした（図 9.5.20 中⑭）。



9.5.6 防災活動・避難行動支援システムの機能

決壊箇所の復旧活動、水防団等の活動に必要な情報として復旧資材の運搬路、一般住民の避難路確保等、防災活動・避難行動に資する情報に基づく支援を実現するため、氾濫流の到達時間・到達範囲および浸水深の時間的变化予測、道路の冠水深から推定できる通行可能な道路などの浸水情報を提供するとともに、道路の特徴を考慮した行動のルートを探索計算し、表示するシステムが必要となる。そこで、本システムにおいては、堤内地の地盤高についてはレーザプロファイラーのデータや、国土交通省が整備している道路のデジタル道路地図(DRM)を用い、堤内地の情報を一元的にデータベースに登録することとした。これらのデータから、堤内地内の道路の情報を取り込み、浸水深との対比の中で宅地の浸水のみならず防災活動に重要な道路に関する情報を提供することができるものと考えられる。

(1) 道路情報を活用したルート検索機能

デジタル道路地図(DRM)の内容を、表 9.5.4 に示す。道路のノード、リンク、種別、車線、幅員等整備されており、膨大なデータベースとなっている。しかしながら、道路の路面高は整備されていないため、レーザプロファイラーの地盤高データを重ねて、道路の地盤高を作成した。

以上のように整理した道路情報を用いて、ルート検索機能を以下のように条件で設計した。

- ①避難路としてのルート検索として、使用する道路に制限を設けない。
- ②水防活動、破堤後の復旧活動に必要な資材運搬避難路の検索対象道路としては、幅員 5.5m 以上で 2 車線以上の道路を対象として、データを構築する。
- ③ルート検索の判定となる水深は、予測時間内の安全な通行判断する必要があり、最大浸水深で判定する。

表 9.5.4 DRM データ項目

項目名	コード表	Baselink.dbf の フィールド名
ノード1 番号 ノード2 番号	ノード番号の小さいものをノード1とし, 大きいものをノード2とする. 各4桁のコード	nodeNO1 nodeNO2
リンクコード	1次メッシュコード(4桁) 2次メッシュコード(2桁) ノード1 番号(4桁) ノード2 番号(4桁) 計14桁のコード	UNIQUECODE
道路種別コード	高速自動車道 都市高速道路 (含指定都市高速道路) 一般国道 主要地方道(県道) 主要地方道(指定市道) 一般県道 指定市の一般市道 その他の道 未調査	RKCD
リンク長	—	LEN
異常気象時通行規制区間種別コード	規制無 雨量規制有 雪規制有 その他規制有 未調査	WKCD
道路幅員区分コード	幅員 13.0m 以上 幅員 5.5m 以上～13.0m 未満 幅員 3.0m 以上～5.5m 未満 幅員 3.0m 未満 未調査	RWDCD
車線数コード	1車線 2車線 3車線 4車線 5車線 6車線以上 未調査 ※上り下りの合計の車線数	RLNCD
車線幅員	-	RLN

以上の条件を踏まえて、ルート検索の方法は、エドガー・ダイクストラによって考案された方法³²⁾を適用した。この方法は、グラフ上の2頂点間の最短経路を効率的に求めるアルゴリズムである。この方法の応用範囲は広く **Open Shortest Path First** などのインターネット・ルーティング・プロトコルや、カーナビの経路探索や鉄道の経路案内においても利用されている。この手法は、多くの解説書が存在し、またプログラムコードも多数公開されているものである。ここでは、文献 33) を参考にシステムに組み込んだ。

ここに、**Dijkstra** 法について概説³³⁾する。**Dijkstra** 法のアルゴリズムは、辺の全ての重みが非負である場合において最短経路を効率的に求める解法（アルゴリズム）であり、その基本的戦略は、各頂点への最短経路を出発点に近い（最短経路の長さが短い）ところから一つずつ確定していくことである。

点 v_1, v_2, \dots, v_m に対して、出発点 v_s からの最短経路が確定している点の添え字の集合を N 、未確定の点の添え字の集合を U とするとき、**Dijkstra** 法の手順を、以下のように説明する。

[**Dijkstra 法の手順**] (出発点 v_s から他の全ての点に至る最短距離を求める場合)

Step1: 集合 N, U を以下のように定義する。

$$U = \{1, \dots, m\} - \{s\} = \{1, \dots, s-1, s+1, \dots, m\}$$

$$N = \{s\}$$

$$P_j = s (j = 1, \dots, m)$$

$$a_s = 0$$

$$a_j = \infty (j = 1, \dots, m)$$

$$i = s$$

Step2: $j \in U$ なるすべての j に対して

$$d_{ij} < \infty \text{ かつ } a_{ij} > a_i + d_{ij}$$

ならば

$$a_j = a_i + d_{ij}, p_j = i$$

とおく。

Step3: a_j の最小値から、 j_0 を求める。

$$\min a_j = a_{j_0} (j_0 \in U)$$

Step4: j_0 を U から取り除き、 N に加える。 $U = \phi$ なら終了する。そうでなければ、 $i = j_0$ において **Step2** に戻る。

それぞれの v_j ($j \in U$) には、出発点 v_s から添え字が N に属する点だけを経由して点 v_j に到達する最短距離 a_j を与えておく．出発点からの道がまだ見つからない点には1を与える．アルゴリズムの実行途中では各点 v_j に対する a_j の値が真の最短距離に等しいとは限らないが、 U の中で a_j の値が $j = j_0$ のとき最小となるとすればこの点 v_{j_0} に関しては、このときの a_{j_0} の値が出発点 v_s からの最短距離になる．そのような点への最短経路はこの時点で確定できるので、この点の添え字を U から N へ移動させる．アルゴリズムの初期状態では、出発点 v_s を除く全ての点の添え字が U に属しており、出発点 v_s において $a_s = 0$ 、任意の v_j ($j \in U$) において $a_j = 1$ となっている． a_j の更新はある点の添え字が U から N へ移されたときに行う．たとえば、 v_i の添え字 i を移す場合を考えると、 U に属する添え字をもつ各点 v_j について v_i を経由して v_j に至る経路の長さ (v_i までの最短経路の長さ a_i と d_{ij} の和) がそれまでに得られた v_s から v_j までの長さ a_j よりも短いかどうかを調べ、短いようなら $a_j = a_i + d_{ij}$ のように更新する．

また、 v_s から v_j への経路は、 $k_1 = p[j]$ として、もし $k_1 = s$ ならば、経路は j_s である．そうでなければ、 $k_2 = p[k_1]$ として、もし $k_2 = s$ ならば、経路は $j \leftarrow k_1 \leftarrow s$ である．以上の操作を $k_l = s$ が成り立つまで繰り返せば、経路 $j \leftarrow k_1 \leftarrow \dots \leftarrow k_{l-1} \leftarrow s$ が得られる．

本章では、ノードおよびリンクに対して浸水深が重みとなる．図 9.5.21 に示すように、浸水範囲掛かるノード・リンクを最短探索時に回避する処理を行った．

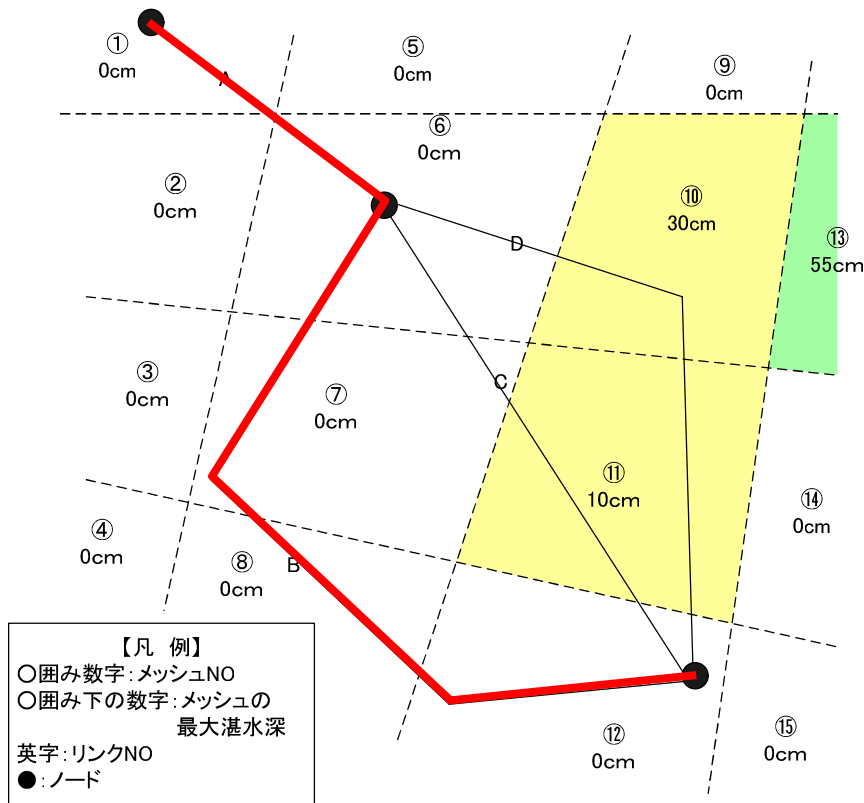


図 9.5.21 リンクの最大浸水深算出と最短ルートの検索の模式図

以上のように基本的なアルゴリズムを用い、最短経路を探索するためのインターフェイスを GIS の画面上で構築した。図 9.5.22 に示すように、画面上でスタートとゴールを指定することで容易に経路が探索できる。なお、この機能は、リアルタイムの予測結果のみならず、過去の予測結果、条件を変えた手動計算結果のいずれの氾濫解析結果に対して適用できるものである。



図 9.5.22 GIS 上でのルート探索の例

(2) 氾濫原の浸水情報表示機能

国土交通省の洪水管理の責務は、洪水予報を発令すること、水防団への活動のための水位情報を適宜福井県・周辺市町に発信することである。河川水位が避難判断水位、氾濫危険水位を超過し、堤防の越水や決壊による氾濫が予想された場合、市町は住民に対して避難準備情報、避難勧告の発令をする必要がある。しかしながら、第 1 章で示したように、実際には避難準備情報や避難勧告を発令しないケースが多く、その理由として河川水位の動向を見ながら発令するというのが実態である。

このシステムでは、市町に氾濫予測結果を活用してもらうために、氾濫解析結果を表示すること以外に、どの地先がどの程度で浸水するのか、避難所は浸水するのか、そのための経路は確保できるのかといった情報を即座に提供できるようにした。

まず、氾濫原内にある避難所に指定されている主要施設、防災拠点、災害時要援護者を抱える介護・医療施設、氾濫による負傷者を救護する医療機関に対して、現時刻から 6 時間先までの浸水深を表示する画面を図 9.5.23 のように構築した。さらに、施設名を

クリックすると、GIS 上の位置が表示されるようになり、地図上での認識もできるように配慮した。また、現時刻から 6 時間先までに浸水する施設を優先的に表示することもできるように配慮した。これは全施設を表示すると、施設数が膨大であるため、職員の見落とし等のヒューマンエラーを防止・軽減するようにしたものである。

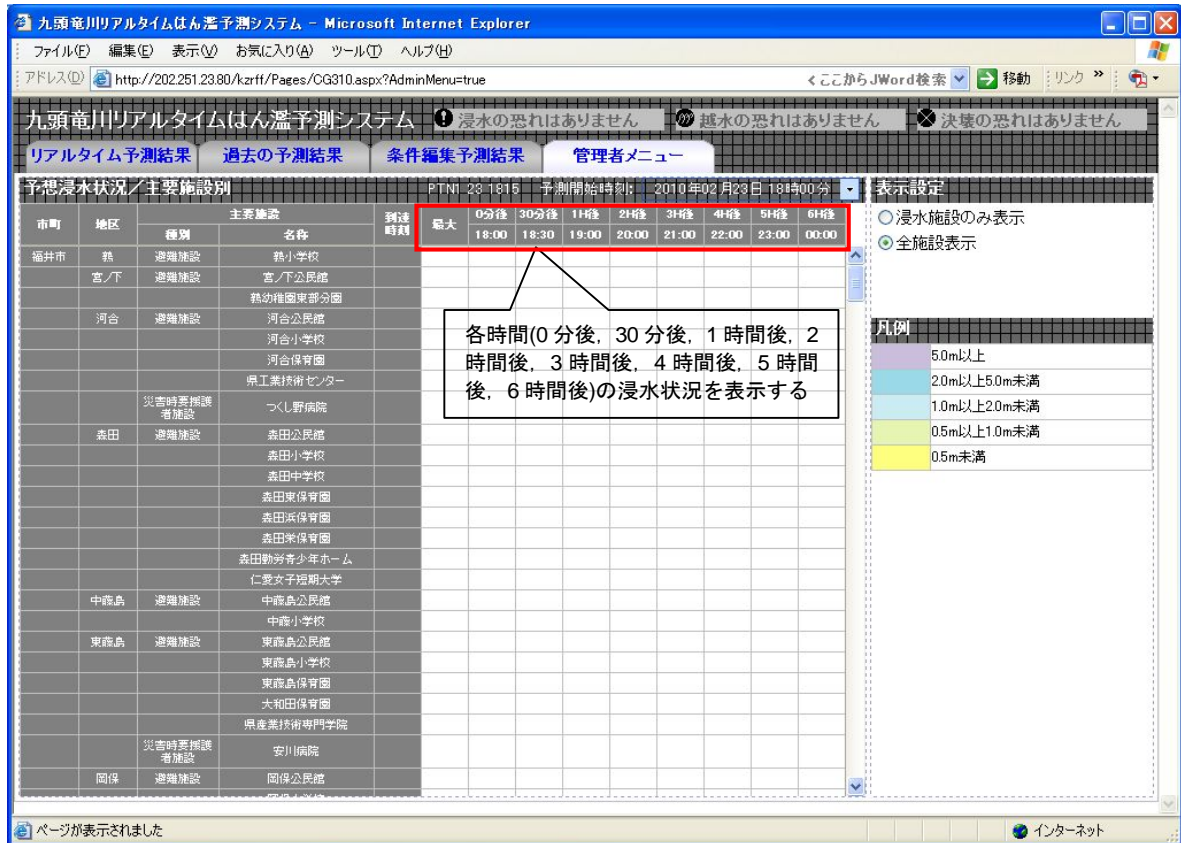


図 9.5.23 主要施設の浸水予測の結果表示

一方で、住民の避難の準備や行動のタイミングについて、市町が判断できるように、図 9.5.24 に示すように市町・地区毎の現時刻から 6 時間先までの時系列の浸水予測情報を提供できるようにした。なお、地区を含む複数メッシュの最大浸水深（内外水氾濫解析結果）に基づき表示することとし、主要施設と同様に、浸水する地区を優先的に表示するものとした。

また、図 9.5.25 に示す避難判断水位、氾濫危険水位といった基準水位の設定されている水位観測所についても、洪水予測システムの演算結果を表示し、河川水位も参照できるように画面を構成した。

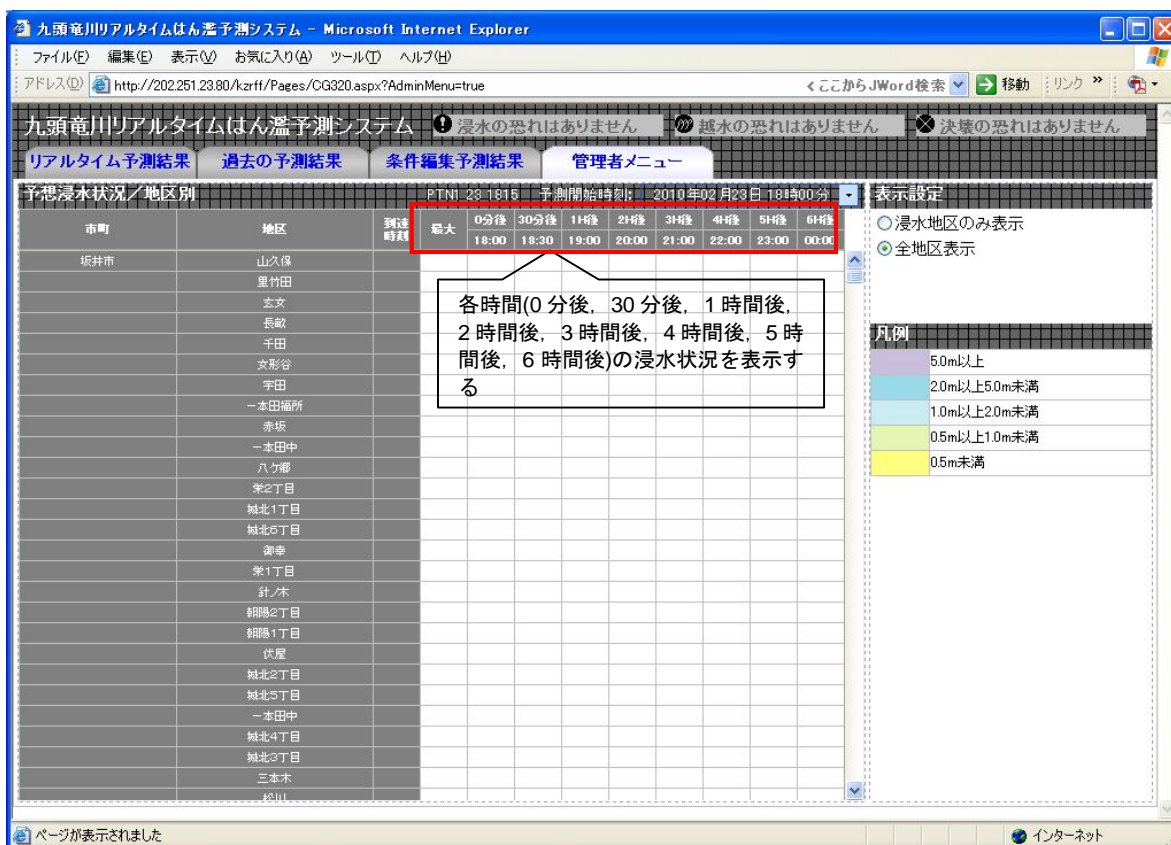


図 9.5.24 市町・地区毎の浸水予測の結果表示

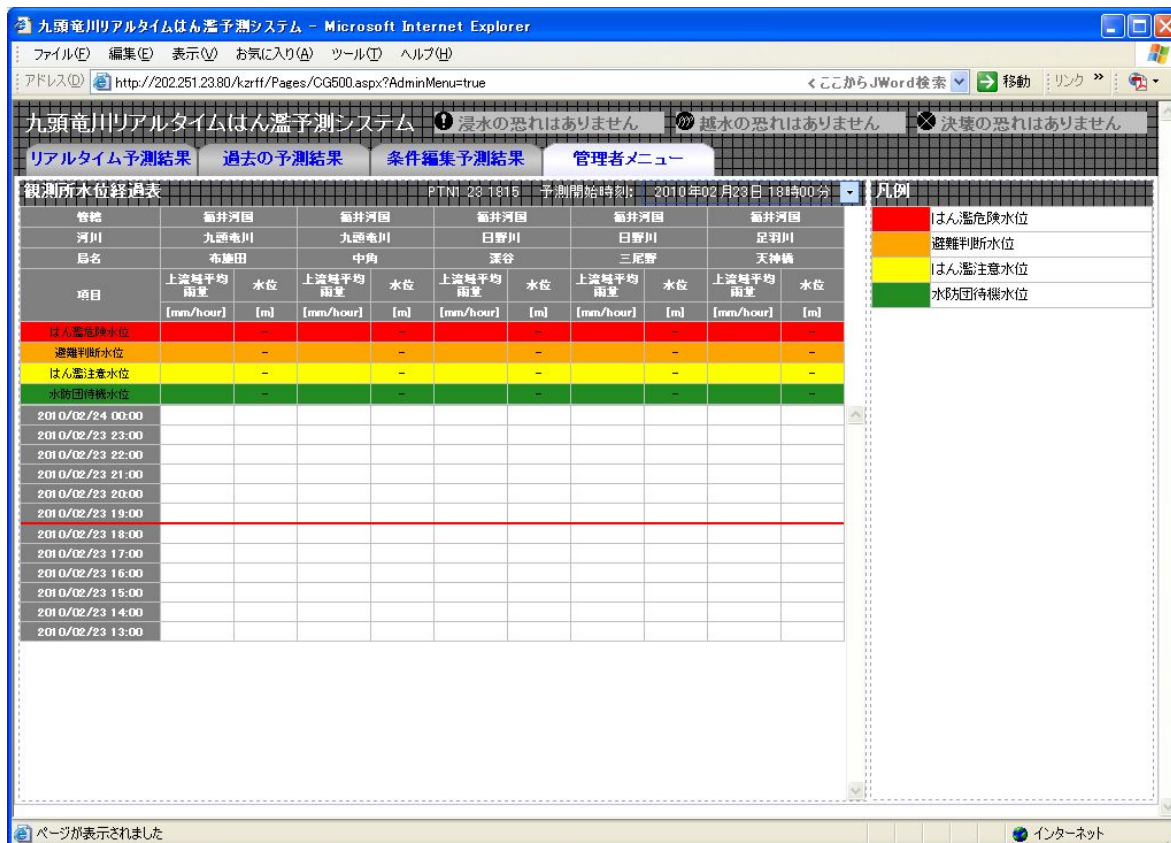


図 9.5.25 水位観測所における予測水位の表示

9.5.7 計算結果データベースシステム

本システムでは、データベースソフトとして、Oracle を利用してデータベースを構築した。この理由としては、取り扱うデータ量が膨大で、瞬時にタスクを実行する必要があることや、このソフトウェア内に組み込まれているスケジュール管理機能が非常に優れており、この機能を使うことで新たにデータベースを稼働させるためのスケジューラを構築する必要性がないため、効率よくシステムを構築することができる。

本章での膨大な氾濫解析データを取り扱う際に、サブシステム間のデータの処理フローを明確にしておく必要がある。そこで、図 9.5.26 に示す下記の凡例を参考に Entity-relationship Diagram を作成し、これに基づき計算関連情報（図 9.5.27），河川情報関連（図 9.5.28），および堤内地関連」情報（図 9.5.29）に分類し、データベースを構築した。なお、ER 図の表記においては、データベースの設計に特化した IE (Information Engineering) 記法³⁴⁾を用いた。

【凡例】

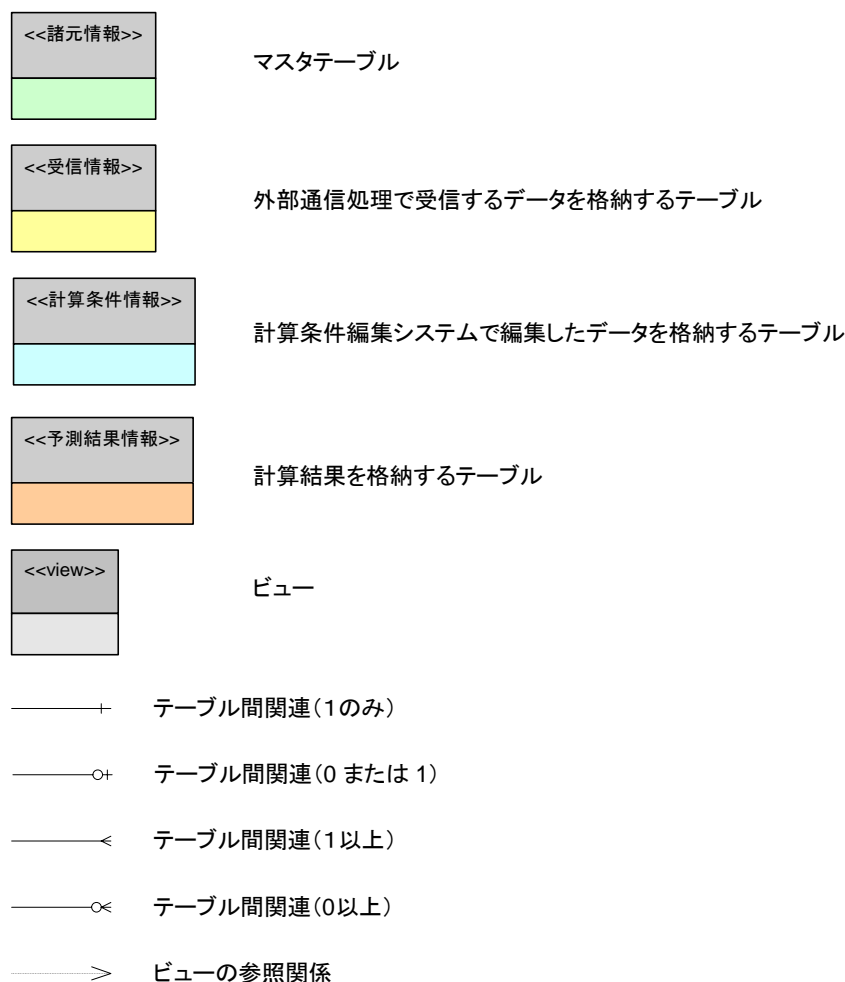


図 9.5.26 E-R 図 凡例

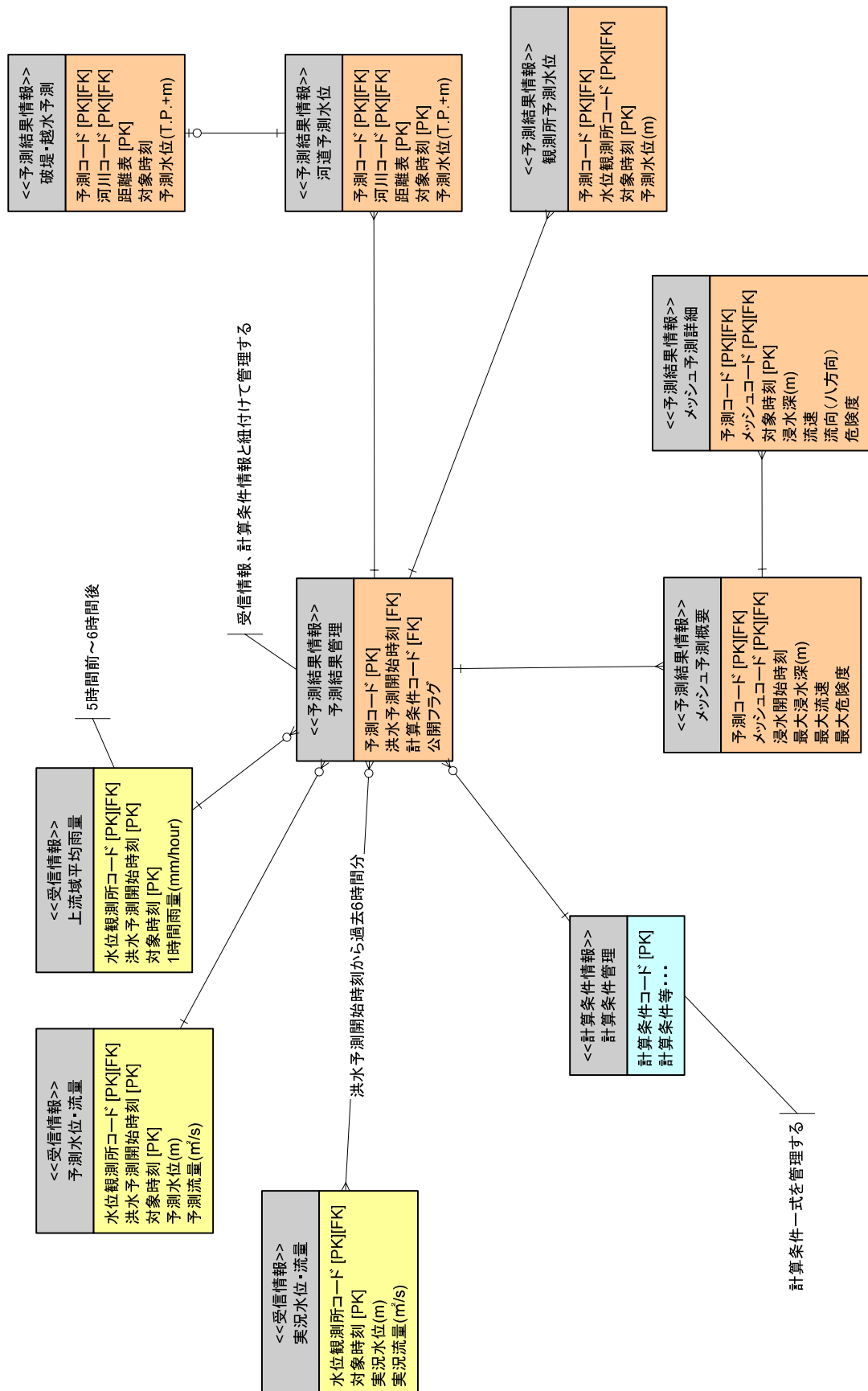


図 9.5.27 E-R 図(計算関連情報)

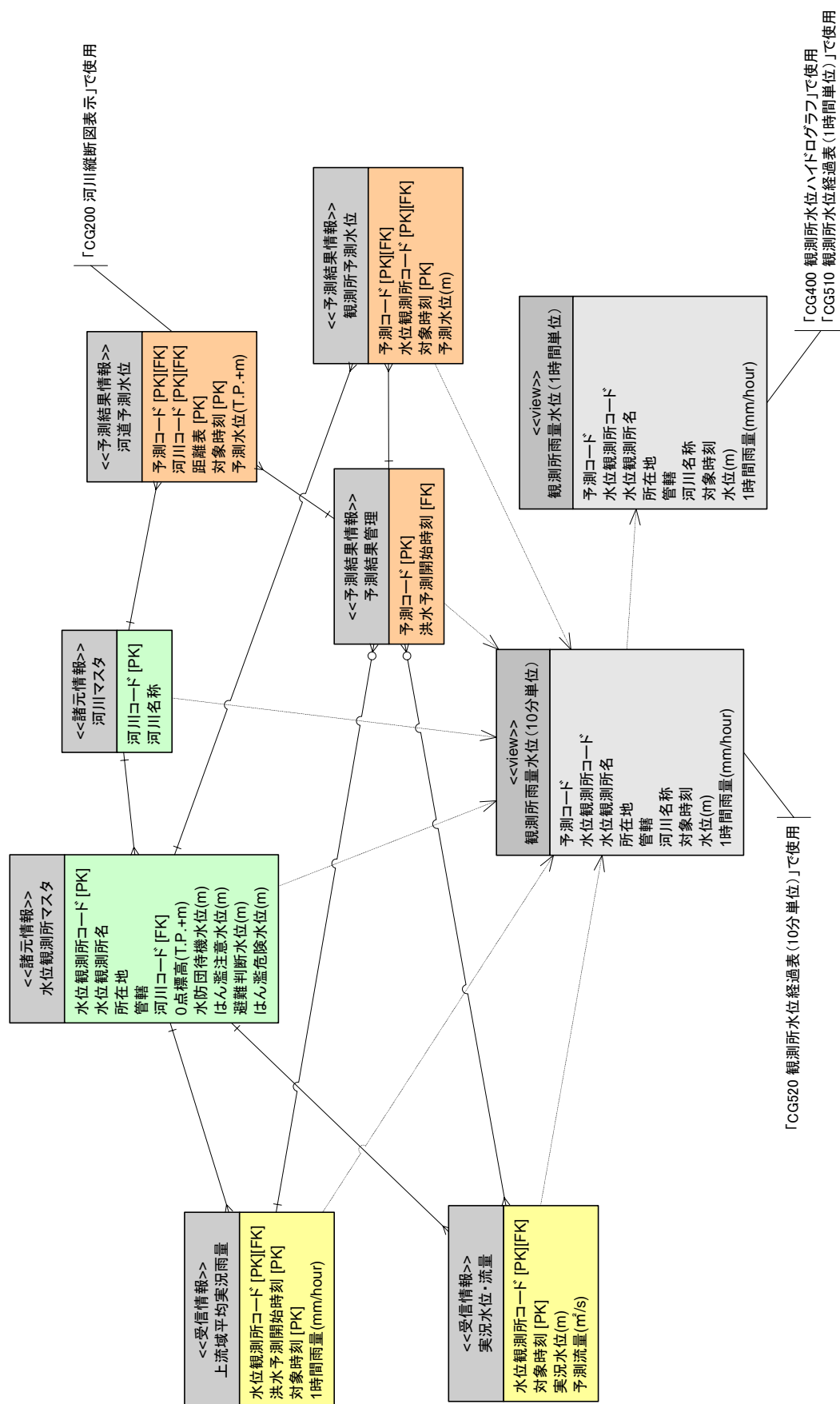


図 9.5.28 E-R 図(河川関連情報)

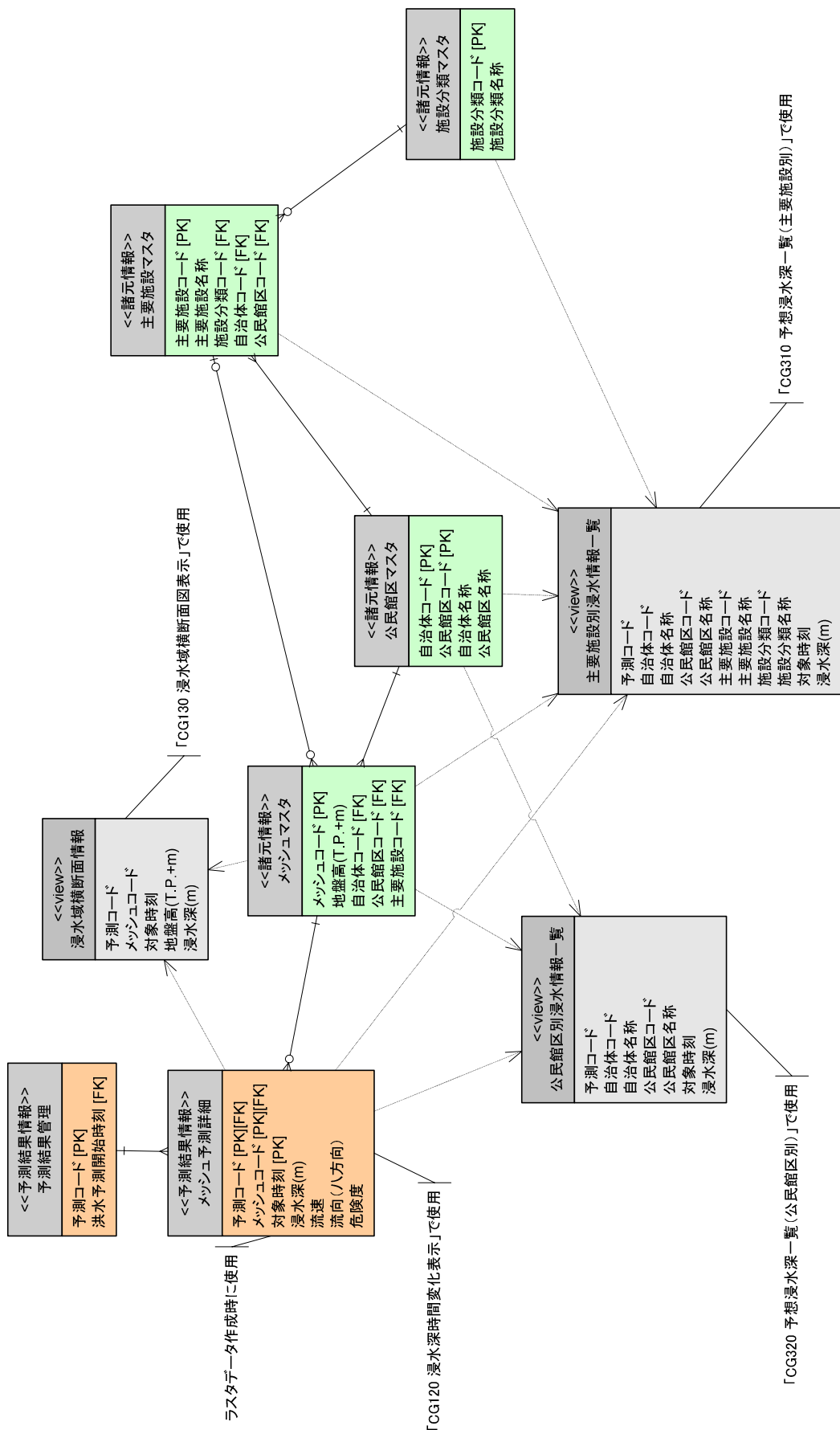


図 9.5.29 E-R 図(堤内地関連情報)

9.6 システムの開発

9.6.1 開発言語

開発に用いた開発言語およびソフトウェアは、以下のとおりである。

- ・ 表示システム開発言語：VB.net, ASP.net
- ・ 計算エンジン開発言語：Fortran
- ・ グラフ表示ソフト：TrueWebChart4.0J
- ・ Web GIS：GegnoSIS.net6.3
- ・ データベースソフト：Oracle Database 10g
- ・ GISデータ作成ソフト：SIS ActiveX Modeller 6.2

9.6.2 サーバの構成

本システムにおいては、氾濫計算を常に2通り実施する必要がある。また、管理者権限として、複数の決壊条件（決壊なし、決壊有り）、任意の手動計算の計算する必要がある。

本システムでは、計算をリアルタイムに実行し、結果に関してはWEBで表示する。これらの処理は、すべての処理を1台で実施することは不可能であり、さらには、計算結果の表示にWEBGISを利用しているため、1台のサーバで処理することは画像処理等に要する時間を考慮すると不可能と判断した。したがって、図9.6.1に示すように、システム構成としては複数台のサーバを活用し、システムを分散処理する方法を採用した。

表9.6.1に、洪水氾濫予測システムをインストールする機器の一覧を示す。なお、サーバにインストールするオペレーション・システム（OS）は、Windows2003serverとした。

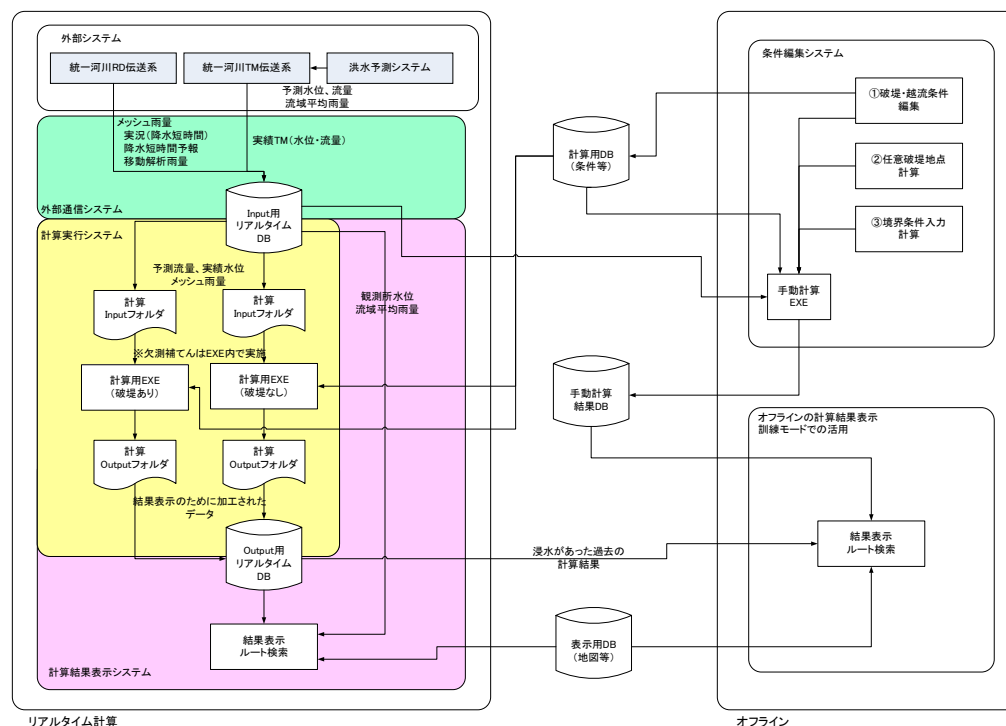


図 9.6.1 ハード機器によるシステム機能の分散処理

表 9.6.1 導入するサーバの概要

名称	機能概要	スペック決定の根拠
通信/DB サーバ	<ul style="list-style-type: none"> 統一河川情報システムからのデータ取得とデータの管理を実施する。 	<ul style="list-style-type: none"> 計算1ステップでは、九頭竜川で8MB程度（×2ケース：破堤有りとなし）必要である。 サーバのHDD容量としては、900GB程度以上とした。16MB（全ケース/1ステップ）×24（時間）×365（日）×5（年間）＝約700GB CPUとメモリに関しては、高性能なものは必要としないためサーバスペックは下記とする。 マシンスペック：CPU Xeon クアッドコア 2.53GHz程度以上、メモリ 4GB以上、ハードディスク 900GB以上
計算実行サーバ 2台	<ul style="list-style-type: none"> 決壊なしと決壊有りの自動計算を1時間に1回実施する。 計算結果をもとに浸水深等の公開用GISデータを作成する。 	<ul style="list-style-type: none"> 計算時間を30分以内で終了させる必要がある。 【テスト計算時のマシンスペック事例】 マシンスペック：CPU Xeon クアッドコア 2.66GHz、メモリ 4GB 予測計算時間：現時刻から6時間先まで計算 メッシュ数：約40000メッシュ 計算時間：15分程度 ハードディスク容量としては、計算データを一時的に保存するものであるが、OS領域とも含めて、100GB以上とする。 マシンスペック：CPU Xeon クアッドコア 2.66GHz程度以上、メモリ 4GB以上、ハードディスク 100GB以上
情報提供サーバ	<ul style="list-style-type: none"> WEB GISを利用して、計算結果（オフラインとオンライン）を表示する。 	<ul style="list-style-type: none"> 計算結果をもとにWeb画面を作成するものである。そのため、メモリ容量が大きいものが必要である。 テスト環境では、下記のスペックで実施していたが、スペックに伴うシステム障害は発生しなかった。 【テスト計算時のマシンスペック事例】 マシンスペック：CPU Xeon クアッドコア 2.53GHz、メモリ 8GB、 GISデータとして、大容量データを扱うため、ハードディスク容量としては、200GB以上とする。 マシンスペック：CPU Xeon クアッドコア 2.53GHz程度以上、メモリ 8GB以上、ハードディスク 200GB以上
条件編集サーバ (ノート PC)	<ul style="list-style-type: none"> 手動入力条件、再計算の実施、計算条件のメンテナンスを実施する。 	<ul style="list-style-type: none"> 計算実行サーバと同等のクロック数を有したマシンとする。 マシンスペック：CPU デュアルコア 2.66GHz程度以上、メモリ 2GB以上、ハードディスク 100GB以上

9.7 おわりに

統一河川情報システムで一元的に集約されている雨量・水位といった基礎データや、予測雨量を利用した洪水予測システムの予測水位・流量のデータを利用して、九頭竜川の氾濫原管理に資する洪水氾濫予測システムを構築した。本章では、九頭竜川の堤内地における氾濫流の追跡方法、システムでの情報提供方法について検討した。

本章で得られた成果は、以下の通りである。

- ・水文・水理学的な知見を活かした内水・外水氾濫モデルを構築し、浸水想定区域図と比較した。その結果、今回のモデルの計算結果は、浸水想定区域図とほぼ同様の氾濫範囲、最大浸水深の結果となり、概ねモデルの妥当であることを示した。
- ・本章の内水氾濫モデルは、九頭竜川、日野川、足羽川から外水氾濫を表現するばかりでなく、堤内地の内水氾濫モデルも組み込んでいる。その結果、シミュレーション結果は、内水氾濫による氾濫範囲が広範囲となっており、住民の避難や水防団の活動にも影響を与えることを示した。すなわち、外水氾濫予測を基本とすると、避難所に逃げ遅れる、あるいは水防団が目的地に行けない等の防災上の問題が発生する可能性があることを指摘した。
- ・このシミュレーションでは氾濫原の主要な道路を考慮したメッシュを設定し、道路による氾濫流の拡散を推測した。これは、氾濫流が道路を川のように流れることが、既往の氾濫調査から明らかであり、対象にした九頭竜川の氾濫原においても同様の現象が起こりうる可能性があることを示した。
- ・洪水氾濫システムを設計・構築するにあたり、河川管理者のみならず、地方自治体にも情報を共有できるように、**Web GIS** を基本としたシステムとし、実現可能であることを示した。
- ・システムの設計構築においては、外部通信システム、計算演算システムなどのサブシステムでの分散処理とした。これらのサブシステム間のデータフローが非常に複雑になるため、データベースを中心としたシステムの構成を示した。このようなシステムを実現するために、データベースとサブシステムの **Entity Relationship Diagram** を作成することや、**GIS** で洪水氾濫情報や避難や水防活動に資するデータを迅速に表示することで、上記の防災支援機能が実現できることを示した。
- ・システムによる計算処理過程として、予測段階での堤防からの越水・破堤を自動的演算する処理とした。しかしながら、計算時間を要するために、引き継ぎ計算処理を行うことで計算時間を短縮することを示した。
- ・国土交通省道路局が整備したデジタル道路地図に氾濫解析結果と重ねることにより、道路冠水を予測できるシステムを構築した。これにより、通行注意や通行止めのための準備や判断のみならず、氾濫時の緊急・応急復旧に利用できる道路や、目的地に対する経路を探索することができる。
- ・堤内地の主要施設などの基盤情報を利用して、氾濫解析結果から主要施設の浸水予測や地先の浸水予測結果に加工し、市町の防災担当者に市町内の避難所の浸水の有無や地先

に到達する氾濫流とその浸水深の情報を提供することができるようにした。これにより、避難準備情報、避難勧告の発令判断のための洪水氾濫予測の情報をリアルタイムで提供することができる。

- ・本システムを実現するには、各機能を1つのサーバで集約し、稼働させることは不可能であることを明らかにした。本システムは結果として、分散させた機能を稼働させるために5台のサーバが必要となった。なお、それぞれの機能を稼働させるためのサーバ・スペックが異なる。例えば計算用のサーバであれば、できるだけ早いものを適用すべきであり、一方でデータベースについてはメモリを多く積載することで、全体のシステムの信頼性を図った。
- ・リアルタイム氾濫予測システムは、WEB GIS を基本として構築した。そのため、LAN 上の PC から、誰もが、氾濫解析結果や危険情報を閲覧することが可能であり、浸水危険情報や被害情報の共有化も可能なシステムとなっている。

一方で、開発したシステムに関しては、まだ、以下の点での課題が残っている。

➤ 情報提供のあり方

- ・今回開発したシステムは、将来的な情報配信を見据えているが、現状では、国土交通省内での閲覧に留まっている。これらの情報を地方自治体や防災関係機関、地域住民へ配信することは防災活動や、避難行動、災害復旧支援効果などが期待できる。その一方で、配信されるデータによっては、地域が大混乱に陥ることも想定されるため、結果の公表方法に関しては、今後検討が必要である。

➤ モデルの精度検証

- ・システム導入後に、内水氾濫も含めて浸水実績やその時点の実績・予測データを蓄積したうえで、今後の精度検証が必要である。

➤ 実運用を踏まえた操作性等の改良点の整理

- ・本システムは、新規で構築されたシステムであるため、計算結果の表示や操作性、防災業務等の実運用での利用状況、ユーザインターフェースの問題点を踏まえた改良が必要と考える。
- ・機器の処理速度の機能向上は日進月歩である。このような土木技術とは異なる分野の技術の進歩に対して、適合していくことが必要と考える。例えば、モデルの計算速度の向上や並列計算が現状よりもより簡易的に可能となるなら、同時に予測できる氾濫のケース数の増加や、氾濫予測結果の空間解像度の高い計算が可能となる。したがって、計算結果の信頼性を向上させることが重要な課題であるものの、情報技術分野の進展を見据えた上で応用技術の開発や適用を考えていく必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局：Xバンドレーダの導入について，2008.12
- 2) 金澤延幸，島田健一，横塚尚志：動くハザードマップの操作と運用，平成 17 年度 河川情報シンポジウム，pp.1-8，2005.2
- 3) 平川了治，舘健一郎，武富一秀，安田浩保，金木誠，飯田進史，五十嵐孝浩，谷岡康：リアルタイム氾濫解析システムの構築とその活用の方角性について，河川技術論文集，第 9 巻，2003.6.
- 4) 安田浩保，後藤智明，山田正：浸水域予測モデルに基づく水防活動の支援システムの構築に関する研究，河川技術論文集，第 8 巻，2002.6.
- 5) 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，pp.1-17，2003.8.
- 6) 飯田進史，舘健一郎，武富一秀，川本一喜，金木誠，平川了治，谷岡康：水害時の避難解析システムの構築と危機管理対応支援の適用性検討，河川技術論文集，第 8 巻，2002.6.
- 7) 前出 2)
- 8) 片田敏孝，桑沢敬行：ダム機能を考慮した下流域の洪水氾濫対策のためのシミュレーション・システムの開発，土木学会論文集 D Vol.65, No.3, pp.280-292，2009.7.
- 9) 前出 3)
- 10) 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，京都大学学位論文，1984.1
- 11) 高橋保，中川一，東山基：洪水氾濫水の動態を考慮した避難システムの評価に関する研究，京都大学防災研究所年報，第 32 号 B-2，pp.757-780，1989.4.
- 12) 中川一，高橋保，沢田豊明，石橋晃睦：GIS を用いた避難行動の解析ー岐阜県古城群上宝村枋尾地区周辺を対象にー，京都大学防災研究所年報，第 40 号 B-2，pp.397-407，1997.4.
- 13) 高埴琢馬，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.15-25，1995.2.
- 14) 国土交通省福井河川国道事務所：九頭竜川・北川水系水防マネジメント計画書～風水害対策編～
- 15) 川池健司：都市における氾濫解析法とその耐水性評価への応に関する研究，京都大学学位論文，2002.3.
- 16) 国土交通省：九頭竜川河川整備基本方針 九頭竜川水系流域及び河川の概要，2006.2
- 17) 国土交通省福井河川国道事務所：平成 13 年度 九頭竜川・北川水系 河川整備基本方針関連資料作成報告書，2001.3.
- 18) リアルタイム浸水予測システムの手引き
- 19) 国土交通省福井河川国道事務所・(株)建設技術研究所：九頭竜川洪水予測システム改良業務報告書，2011.3.
- 20) 井上和也：開水路非定常流の数値計算法とその水工学への応用に関する研究，京都大学

学位論文, pp.92-101, 1986.

- 21) 前出 15)
- 22) 国土交通省福井河川国道事務所：平成 18 年度九頭竜川治水経済調査検討業務報告書，2006.3.
- 23) 国土交通省福井河川国道事務所：平成 14 年度 九頭竜川流域航空レーザー計測業務報告書，2002.3.
- 24) 栗城稔，末次忠司，海野仁，田中義人，小林裕明：氾濫シミュレーション・マニュアル（案）ーシミュレーションの手引き及び新モデルの検証ー，建設省土木研究所資料 No.3400，1996.2.
- 25) 国土交通省福井河川国道事務所：平成 18 年度九頭竜川治水経済調査検討業務報告書，2006.3.
- 26) 国土交通省福井河川国道事務所：平成 19 年度 足羽川浸水想定区域図作成業務報告書，2007.3.
- 27) 前出 17)
- 28) 橋本健，長谷川正：土地利用変化を評価する流出モデル，土木技術資料19ー5，pp.11～16，1977
- 29) 国土交通省福井河川国道事務所：平成 18 年度九頭竜川治水経済調査検討業務報告書，2006.3.
- 30) 福井県：河川激甚災害対策特別緊急工事 足羽川浸水想定区域図作成業務報告書，2008.3.
- 31) 国土交通省：統一システムテレメータ伝送仕様(案)
- 32) Dijkstra, E.W. (1959): A note on two problems in connecion with graphs, In Numerische Mathematik, 1 (1959), S. 269 ~ 271.
- 33) 坂和正敏：線形システムの線形化，森北出版，1995
- 34) 例えば，情報処理学会：情報処理ハンドブック，オーム社

第 10 章 結論

10.1 本研究で得られた成果

河道内の洪水量を軽減する洪水調節を目的としたダムや、河道改修による治水効果を期待した河川整備が完成するまで、かなりの時間と費用を要するために、完成までの間に現状の治水安全度や計画規模を超過する洪水が発生し、堤内地に甚大な被害を及ぼす可能性があることが懸念されている。さらに、近年河川法で規定された河川整備基本方針や河川整備計が目標としている外力設定を超過する洪水が現実的に発生していることや、地球温暖化に伴う気候変動による台風性、前線性の豪雨による洪水量が増大し、洪水氾濫によるリスクが増加する可能性があることも懸念されている。

一方で、治水計画の妥当性については、被災後の復旧・復興や資産損失という経済的な指標によって評価あるいは検証されてきた。降雨・流出現象に影響をあたえる自然・社会的環境の変化が不確実性を伴うものの、想定した外力で堤内地の住民へ直接的・間接的な被害を予測することが可能な技術レベルに達しているものと考えられる。すなわち、実際に起きうる降雨・流出・氾濫に対する行政・住民は、一つの外力で想定されたもので判断や行動が規定されるわけではなく、そのときに発生する外力の規模毎に行政や自主防災組織、住民には臨機応変な対応が求められており、それを支援する数値シミュレーションの技術が蓄積されてきているものと考えられる。

本論文は、昨今防災上の課題である行政・住民双方に存在する問題として、避難行動のための判断基準について、それぞれの立場を踏まえた具体的な方法の提示やその普及・啓発方法についてとりまとめた。さらに、河川管理者（国土交通省や都道府県等）は、法的に指定した河川については洪水予警報を行わなければならない。この警報の発令を支援する洪水予測システムの精度を向上させるため技術的な検討を行った。この洪水予測システムと連動し、破堤や越水といった堤防の強度に対する不確実性に影響を受ける堤内地の洪水氾濫予測の方法とその具体的なシステム化に関する検討についてとりまとめた。以下に、各章で得た成果を要約する。

第1章では、長崎水害での大水害後に策定された非構造的な対応から、近年までの災害実態とその後の行政の対応や住民に要求されている対応について、省庁・地方自治体の答申等についてレビューした。その課題として、避難勧告等の発令などの基準が洪水予報河川や水位情報周知河川に法的に指定された河川だけを対象にした基準水位に基

づくものであり、河川氾濫の実態に必ずしも則したものはなっていないことや、河川氾濫の多くは中小河川が多く、大河川の氾濫以前に上流の河川で氾濫するといった実態にも則していないこと、さらに外水氾濫のみを対象にしており外水氾濫以前に内水氾濫が発生し避難が困難になる可能性もあることから、現実の課題に対して十分な検討ができていないことを整理した。一方で、自主防災組織やその属する住民の対応についても、氾濫の情報をどのように理解し、自らの避難判断や行動に繋げるのかが不明であるとともに、河川管理者の持つ情報を有効に活用するための方法に課題があることを指摘した。以上のレビューから、本研究では滋賀県の洪水予報河川や中小河川群とその堤内地をモデル地区として、避難判断基準の作成方法の視点に基づく実践的な研究や、行政の洪水予警報業務をより精度の高いものにするための洪水氾濫予測の精度向上に関する研究の必要性について言及した。

第2章では、行政から住民の避難誘導までの情報伝達と避難判断・行動に関する第1回図上訓練の結果から、自主防災組織や社会福祉団体の避難のあり方や行政の支援方法について論じた。その中で、興味深い結果として、身体障害者や高齢者などを介護している社会福祉団体の避難行動として、水平避難が困難であることが明らかにされた。一方で、このような避難が困難である団体においては、水平避難と垂直避難を併用した段階的避難の可能性があることを示された。段階的な避難を選択することで、避難準備に要する時間が短縮され、要援護者への直接的な支援に集中できるものと考えられる。この避難方法の選択により、洪水時における新たな対応、情報連絡体制などの課題抽出と解決策について検討した。これらの結果は、社会福祉団体における避難行動のひとつとして、今後の方向性を示したものである。さらに、行政は洪水の規模と各地先の安全度（どこまで浸水するのかなど）といった情報を、自主防災組織や社会福祉団体と共有する仕組みの必要性、地域防災計画では到底表現できない細やかな情報を整理し、地区単位での防災計画策定の必要性を指摘した。このような結果を、それぞれの立場の課題を抽出し、避難計画に資する施策を抽出することが可能であることを示した。以上のような検討結果を踏まえて、避難行動マニュアル等が正常に稼働することを確認するために、洪水波形の具体的な提示や時間の設定を訓練のプレイヤーの環境に制約を与えることで、各機関の弱点、機関間の情報伝達や内容に関する課題を抽出することが可能となることを示した。また、抽出された課題への対応策（マニュアルの見直し等）を検討し、再度訓練で確認するといったPDCAサイクルは、防災計画を検証する上で重要な取り組みであると再認識されたものと考えられる。さらに、改善された避難計画等を、本研究のバックグラウンドとなった湖北圏域水害・土砂災害に強い地域づくり協議会の支援を受けながら、行政と住民が一体となって非構造的な洪水対策の普及・啓発を行っていくことが重要である。

第3章では、地方自治体が避難準備情報、避難勧告・指示を発令できないという社会的問題を背景に、氾濫解析結果を利用して行政の持つべき避難勧告等の発令基準の作成

方法について検討した。滋賀県姉川水系を対象として、人的被害が発生する可能性が高い地区を抽出し、法的に指定されている洪水予報河川、水位周知河川における観測水位に応じた避難勧告等の発令基準の作成方法について具体的に検討した。まず、住民や自主防災組織で伝承されている危険な箇所を特定し、住民が居住している地区の浸水リスクと現状の水位観測所での水理的な関係を明確にすることで、発令基準と連動した住民の経験知を生かした避難判断基準を作成することを示した。その上で、内外水氾濫を考慮した氾濫水理モデルによる解析結果は、外水氾濫だけのそれよりも、堤内地の内水氾濫による浸水リスクが増すため、河川水位だけで避難勧告を発令しても住民が避難できないことや、避難が遅れることが推測された。そこで、地方自治体が、避難勧告を発令する地区を、状況に応じて選定するために、人的被害が発生する可能性が高い地区を対象にすることに加え、内水氾濫による避難が困難になる時間を考慮することが重要であることを指摘した。すなわち、避難判断水位に到達し、県から氾濫注意情報が発令される時から氾濫危険水位に達するまでの時間内に避難が完了するかどうかを評価する必要があることを示した。この情報を基にして、対象地区別に避難勧告等を発令する際に、浸水の深刻さに応じた避難勧告に付加する避難を促す情報を作成した。さらに、モデル降雨波形、既往降雨と同じものが襲来することはないため、対象とした姉川・高時川に加えて、水位周知河川である支川田川、草野川の状況にも対応した避難勧告の発令地区とその提供する情報についても作成した。以上の検討から、現状の防災行政上の問題を解決することができるものとして、地区別の避難勧告等の発令基準の作成が可能であることを示した。

第4章では、河川や流域の水文水理情報が乏しい地域を流れる中小河川群の地区別の避難判断基準の設定について検討した内容を取りまとめた。まず、滋賀県高島市を流れる中小河川群を対象として、降雨波形に応じた内外水氾濫解析を実施し、超過外力を含めた避難方法の検討を行った結果、ほとんどの地区における避難方法として一時的に垂直避難を選択できることがわかった。一方で、歩行困難な状態等で避難ができなくなる恐れがある地区においては、地区毎の氾濫特性を踏まえ、避難勧告等の発令基準と合わせて、集落内の住民自らが避難の準備や行動を判断できる目安を作成し、行政の発令する避難勧告等と連動した目安を作成することを示した。また、行政は住民に水平避難を前提とした勧告等を発令するが、周辺の状況や逃げ遅れ等を考慮した自主的な判断・行動を促すために、垂直避難の選択を避難勧告・指示に付加することを提案した。

第5章では、米原市村居田地区を対象に、滋賀県の流域治水政策のひとつである「備える」対策として、非構造的洪水対策の実施過程を通して、行政と住民の洪水氾濫に関するリスク・コミュニケーションの過程や住民の意思決定に、行政が持つ洪水氾濫に関する情報の開示が重要であることを示した。本章においては、氾濫解析による地区の治水リスクを住民に理解し、河道改修の推進と並行して、超過洪水を含めた人的被害をゼロにするための対策（非構造的洪水対策）の合意形成過程とその実現方法について考察し

たものである。まず、非構造的洪水対策（備える対策）が避難判断行動に対して有機的な機能を発揮させ、住民、自主防災組織の防災意識を啓発・向上するためには、行政側の氾濫情報の開示を基本とした積極的な行政支援が必要であることを示した。このことにより、対象地区においては、住民側の危機意識の変化、すなわち洪水氾濫リスクに対する受け身の立場から自ら身を守る主体的な立場に変化することが確認された。すなわち、このようなプロセスにおいて、住民側の立場が、河道改修といった洪水対策をしてもらうという行政依存型から、共に堤内地の対策を考えていく自主的な立場での意見に変化している。これは、地区住民の防災上の問題を認識し、備える対策による身の安全の確保の重要性と、それに伴う非構造的な洪水対策の計画・実施を受容したものと考えられる。

第6章では、吉井川水系苫田ダムとその下流区間の洪水予測システムの構築に向け、予測精度向上を目的にしたモデルの定数設定とフィードバックシステムに組み込む非線形フィルタリングの適用性について検討した。さらに、流出予測モデルを組み込んだ洪水予測システムと連動したダム放流量設定支援の開発の考え方について検討した。

まず、分布型洪水予測モデルを構築する際に、最適定数の同定方法として、**SEC-UA**法を適用した。その結果、検討対象洪水での同定結果は良好であった。さらに、洪水予測システムの精度を向上させる方法として、現時刻の観測値を説明する状態量を精度よく推定するために、従来から適用されている過去の状態量の時系列的な誤差を観測値に適合させる方法や、非ガウス型非線形フィルタリング手法である粒子フィルタ (**Particle Filter**)法の適用を検討した。その結果、いずれの方法も実用上の精度は担保されていることがわかった。

上記のモデルを組み込んだ洪水予測システムを演算部分以外をプラットフォーム化することによる、予測モデルの種類に依存しないシステムの設計を行った。これにより、流域毎、ダム毎にシステムを構築する必要性がない。さらに、ダム操作支援については、操作規則で定義されている操作以外にも、下流の氾濫を制御する臨機応変な操作が社会的に要求されるケースもあることから、それに対応した下流区間の予測計算とその結果を容易に比較できるように配慮した。これにより、非常時のダム操作による下流への影響を把握でき、操作の意志決定支援に役立つものと期待される。開発したシステムは、日常はあまり稼働しないことから、職員の教育・訓練に使えるようにも配慮し、自由に演算ができる機能を開発した。

第7章では、現時刻時点の水位に対して流域の状態量をデータ同化する方法として粒子フィルタ (**Particle Filter**)法を適用し、現時刻までの状態推定法の妥当性を示すとともに、予測雨量の持つ誤差を利用した確率的な水位を予測するシステムの構築の可能性について検討を行った。その結果、現時刻までの状態量の推定においては粒子フィルタ法によって精度の高い結果が得られるとともに、予測段階における予測雨量の誤差幅を考慮した予測結果は、概ね実測水位との整合性が高いことがわかった。この背景として、

予測段階の与条件である予測雨量の誤差分布の推定には、二次元指数分布を適用し、周辺分布が一次元指数分布になるように $1/2$ 乗のデータ変換をすることにより、適合度のよい結果が得られた。また、定数は平均値と相関係数であり、これまでのガンマ分布を用いる場合と比較して、経験的な観点からシステムを構築することは少なくなると考えられる。次に、洪水予測モデルに粒子フィルタ (Particle Filter) を結合させて、1~6 時間前から現時刻までの状態量を補正するモデルを構築した。このモデルから、6 時間先までの予測水位と実績水位を比較した。その結果、実績水位が、現時刻に対する信頼区間内に入ることから本手法の妥当性を示すものである。さらに、現時刻時点での状態量を下に、3 時間先の予測結果では、信頼区間内で変動しているものの、予測雨量の誤差が反映された結果となっており、3 時間前の段階で、実績水位に到達する可能性が予想された。この結果より、信頼区間等の情報を有効活用することにより、洪水予報や水防警報等の判断の遅れを回避できる可能性があることを示した。

第 8 章では、非線形フィルリング手法のうち粒子フィルタ (Particle Filter) を淀川水系における三川合流部前後の複雑な流況を予測する方法について検討した。まず、分布型流出予測モデルによる上流域の流出量を基本とした予測システムに、下流部の背水区間、HQ 式の信頼性を考慮し、不定流モデルを適用した。その結果、粗度係数といったパラメータは経験的に同定することができるため、流量の精度に着目し、流量の補正係数を状態量とすることで、現時刻の水位に対して、非常に高い精度で予測できることがわかった。これは、水位に合わせるように状態量が増減したためであり、従来の流量を信頼した方法に比べれば、今後の適用性が高い方法であると考えられる。さらに、現時刻の状態量を初期状態として予測計算した結果、その適合性は非常に良いことがわかった。粒子フィルタ (Particle Filter) による予測計算においては、粒子の確率密度から期待値を算出することができる。そのため、今後の水位予測の表示や提供に際し、基準水位の超過確率を提供することができることにより、避難判断・行動や水防活動などに有効に機能する情報提供内容になるものと期待できる。

第 9 章では、統一河川情報システムで一元的に集約されている雨量・水位といった基礎データや、予測雨量を利用した洪水予測システムの予測水位・流量のデータを利用して、九頭竜川の氾濫原管理に資する洪水氾濫予測システムを構築した。本研究では、このシステムを構築するまでの氾濫流の取り扱い方、システムでの情報提供の方法について検討した。まず、水文・水理学的な知見を活かした内水・外水氾濫モデルを構築した。本研究の内外水氾濫解析結果から、九頭竜川、日野川、足羽川の外水氾濫を表現するばかりでなく、堤内地の支川や窪地などを考慮した水理モデルによって内水氾濫が表現できることや、その結果を用いれば住民の避難や水防団の活動にも影響を与えることが示された。すなわち、外水を基本とした氾濫予測では、住民が避難所に逃げ遅れること、あるいは道路冠水等によって防災活動に支障が生じる可能性があることを示した。また、このシミュレーションでは氾濫原の主要な道路を考慮したメッシュを設定し、道路によ

る氾濫流の拡散を推測した。その結果、九頭竜川の氾濫源においても、道路上の氾濫流が浸水域を拡大させる可能性があることを指摘した。これとは逆に、道路周辺の地盤高が道路に比べ低い所では浸水深が大きくなる地区もあることがわかった。

次に、洪水氾濫モデルを組み込んだ洪水氾濫システムを設計・構築するにあたり、河川管理者のみならず、地方自治体にも情報を共有できるように、Web GIS を基本としたシステムとした。システムの設計・構築においては、外部通信システム、計算演算システムなどのサブシステムでの分散処理が必要であり、また、サブシステム間のデータフローも複雑になるため、データベースを中心としたシステムの構成を提案した。これを実現するために、データベースとサブシステムの Entity Relationship Diagram を作成し、GIS で膨大な洪水氾濫情報や時間的に制約を受ける避難や水防活動に資するデータの表示が可能であることを示した。さらに、システムによる計算処理過程として、予測段階での堤防からの越水・破堤を自動的演算する処理とした。しかしながら、氾濫解析に時間を要することに対処するために、当該時刻以前の洪水氾濫予測結果を引き継ぐことにより、計算処理に要する時間を短縮することを示した。

このようなシステムを防災体制、水防活動、避難判断・行動に活用するためのコンテンツを作成するにあたり、国土交通省道路局が整備したデジタル道路地図を用いることで、氾濫解析結果と重ね道路の浸水を把握することができることを示した。これにより、通行注意や通行止めのための準備や判断のみならず、氾濫時の緊急・応急復旧に利用できる道路や、目的地に対する経路を探索できることを示した。また、堤内地の主要施設などの基盤情報を利用して、氾濫解析結果から主要施設の浸水予測や地先の浸水予測結果に加工し、市町の防災担当者に市町内の避難所の浸水の有無や地先に到達する氾濫流とその浸水深の情報を提供することができるようにした。これにより、LAN 上の PC から、複数のユーザが同時に氾濫解析結果や危険情報を閲覧することが可能であり、浸水危険情報や被害情報の共有化が可能なシステムが構築された。

10.2 今後の研究課題

第2章から第4章までは、行政の持つべき避難勧告等の発令判断基準の作成方法とその適用と、法的に指定されていない河川の堤内地に住民に対する避難判断基準の作成方法についてとりまとめた。これらの章では、計画規模を上回る超過洪水を対象にした外力までを対象にした検討した氾濫のリスク評価を行った。さらに、第5章では、米原市村居田地区を対象に非構造的洪水対策の実現に向けたリスク・コミュニケーションの過程をとりまとめた。

これらの検討において、垂直避難が人的被害の発生が想定されないような地域や、災害時要援護者を抱える医療福祉や介護福祉団体の避難方法として有効であることが示された。一方で、このような垂直避難を地域防災計画上位置づけることは、まだ災害対策基本法でも明文化されていないため、身を守る一時的な避難方法としての有効性が指摘されているのに止まっているのが現状である。住民の避難方法の一つとして、垂直避

難を位置づけることにより、洪水氾濫に対して行政の負担が軽減できる可能性もある。今後は、このような避難形態の必要性を各地区に啓発することが必要であるとともに、自主防災組織の防災計画に反映させていくことが必要となる。このような、取り組みを県レベルで行うのか、市町村レベルで行うのかは、地区の事情等を加味していく必要があると考えられる。しかしながら、近い将来超高齢社会になる地区が多くなることから、河川管理の側面からの避難方法だけではなく、寝たきりの状態や独居の高齢者や避難時に援護が必要な身体障害者、幼児、外国人などを包括した避難のあり方を、避難判断基準を基本とした自主的な避難方法や支援方法などを取り決めておくことや、そのための行政の支援方法を確立しておく必要である。

次に、第6章から第8章においては、洪水予測の精度向上に関する研究では、洪水予測の要となるフィードバック手法にフィルタリング技術の高い適用性が示されたばかりでなく、汎用性を追求したシステムの設計・構築方法について論じた。さらに、第9章においては、洪水氾濫解析モデルの構築と、それを組み込んだ予測システムの設計・構築方法について論じた。

洪水予測モデルや、氾濫解析モデルの精度は既往洪水においてはある程度担保されていると解釈しているものの、計画規模を超過する洪水が発生した場合の降雨・流出過程の再現性について、今後課題があるものと考えられる。したがって、今後生起する洪水に対する各モデルの精度検証と定数の同定作業は必要なものと考えられる。さらに、内水氾濫の発生に対するモデルの精度向上、破堤や越水の箇所再現性、氾濫流の拡散状況の再現性を検証することが必要である。

その一方で、本研究の入力条件である降雨予測の精度向上も必要である。気象庁や国土交通省といった行政機関によって公表されている降雨予報値（予測値）は、これらの洪水予測結果の確度を左右する。したがって、精度評価においては、第7章で示した予測の幅を設定し、それに応答する流出モデルの精度を評価するとともに、予測過程におけるモデルの定数の最適化の技術も今後必要になると考えられる。また、観測された河川水位については、信頼性が高いと考えられるものの、その時点を通過する流量の精度は、過去のHQ式に依存しているのが現状である。したがって、洪水の規模によってはHQ式の適用水位範囲外や、河床変動により一意的な関係が崩れたときには、流量を信頼したシステムでは洪水予測が破綻することが懸念される。本研究で適用した非線形フィルタリング手法は、観測値から見えない状態量（ここでは、流量）を推定することが可能である。洪水予測の精度をさらに向上させるためには、流量の推定が可能であるかどうか検証を進めるとともに、リアルタイムでの流量推定システムが開発されれば、洪水予測の精度が向上するものと考えられる。

また、洪水予測システムならびに洪水氾濫予測システムにおいては、河川管理者からの洪水予警報・水防警報の発令に着目し、地方自治体の避難勧告等の発令に伴う住民の避難や、水防団の出動・現地作業に対して、システムで作成される情報が現場での作業や判断に有効であるのかを検証する必要がある。国土交通省・都道府県・地方自治体・自主防災会における時系列的な避難判断・行動との関連性をレビューすることで、従来

の防災体制とシステムの連携において、システムでの支援方法について検討することが必要であると考えられる。

以上のような二つの観点から研究の必要性について指摘した。しかしながら、洪水対策として位置づけではなく、社会システムに地域防災計画や自主防災組織の持つ避難行動マニュアル等が洪水時に正常に稼働することを確認するためのチェック機能が必要である。一方で、本研究で開発した情報システムを利用し、具体的な洪水をシミュレートし、図上訓練のプレイヤーの環境に制約を与えることで、各機関やそこに属する職員の弱点、機関間の情報伝達や内容に関する課題が抽出され、かつ再認識できる仕組みが必要となる。このような取り組みは、いわゆるリスク・マネジメントに基づく PDCA サイクルに基づいており、抽出された課題への対応策（マニュアルの見直し等）を検討し、再度訓練で確認するといった一連の作業が、防災計画を検証する上で重要であると考えられる。

行政や住民のリスク・コミュニケーションの事例研究を第5章で論じた。対象とした地区の自主防災組織や住民には様々なツール（まるごとまちごとハザードマップや避難の目安となる河川水位・観測所水位との換算看板やビラの配布など）を適用したが、全て行政側からの情報提供であり、このような基礎情報を自主防災組織に提供できる仕組みがまだ十分に確立されていない。したがって、このような取り組みを普及させるためには、住民への洪水氾濫のリスクの理解と対応について議論できる場を提供し、リスク・コミュニケーションを活性化させることが必要である。さらに、地区の住民や自主防災組織における洪水氾濫のリスクに対して、地区が設定した防災目標に対してどの程度達成したのかを評価するために、コンサーン・アセスメント手法の開発が必要である。すなわち、それぞれに地区における防災上の目標に対して、強化すべき課題を簡易的に明確にする方法を開発し、実際の現場においてその適用性を図る必要がある。

以上、本研究によって得られた成果と今後の研究課題について述べた。この研究では、建設コンサルタントとして、国土交通省や都道府県が発令する洪水予警報、水防警報の支援方法や、地方自治体が躊躇なく避難準備情報、避難勧告・指示を発令するための基準とそれと連動した住民自身が判断できるような目安の作成を試みた。研究課題で述べたように、課題は多く残されている。また、平成 24,25 年の災害事例から地方自治体の洪水時の対応を分析しても、住民への勧告・指示が遅れているばかりでなく、万人単位の人数に避難勧告を発令している事例もあり、依然各自自治体での検討が不十分であると考えられる。このような課題に対して、机上で A Priori 的に解決するのか、あるいは避難行動等の経験から A Posteriori 的に解決するのかは、現場の状況や条件を踏まえた技術的な検討が必要である。

人的被害の可能性を限りなく小さくすることができる地域とは、人との繋がりを基本としたコミュニティであることを信じてやまない。このような信念の下で、これから迎える高齢あるいは超高齢社会を前提とする安心・安全を担保した地域の形成は、これか

らの社会資本の基礎となるものと信じている。この実現と同時に、地域社会における防災活動が特別なものとして扱われるのではなく、日常の生活や行事の中の一つとなり、溶け込んだものとして存在することが必要と考えている。本研究が、洪水災害をはじめ土砂災害や地震災害に応じた対策を講じる際に、地域防災力の向上の一助になれば幸いである。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、終始懇切丁寧な御指導を賜った立命館大学理工学部教授 里深好文先生に深甚なる謝意を申し上げます。先生には学位取得のための研究の方向性をはじめとして、河川工学、砂防工学を基礎とした防災的な観点からの御指導を頂き、また本研究を通じて技術者・研究者としての今後のあり方について御教示頂きました。本学位論文のとりまとめに対して、自分なりに納得のいく形で進められていったのも、一重に先生の大らかな御指導によるものと確信するものであります。

本論文は、立命館大学理工学部教授 WELLS John Craig 先生ならびに大窪健之先生におかれましては、学位論文をまとめるにあたり、御専門の立場から論文の内容について御指導を頂くとともに、博士論文の審査をして頂き、ここに厚く御礼申し上げます。

私に研究への道を開いて下さった江頭 進治先生、大同 敦之先生には、一方ならぬ御心配をお掛けして、ここにお詫び申し上げます。水災害・リスクマネジメント国際センター (ICHARM) 研究・研修指導官および政策研究大学院大学教授 江頭 進治先生には、博士課程入学から現在まで、長年に亘る御指導を頂くとともに、学位取得に対して叱咤激励して頂きました。また、先生から御指導して頂いたことは、仕事や研究において一時も忘れずに今日に至っております。ここに、深甚なる謝意を申し上げます。また、水工学研究室配属から修士課程終了まで御指導頂いた立命館大学名誉教授 大同 敦之先生には、現在まで暖かく見守って頂き、ここに、深甚なる謝意を申し上げます。

本研究の内容は、滋賀県の流域治水政策に関連する業務、兵庫県の洪水予測に関連する業務、さらに国土交通省近畿地方整備局、中国地方整備局における洪水予測に関連する業務で培ったものであります。滋賀県の流域治水政策に基づく備える対策に関する業務・研究を進めるにあたり、京都大学教授 防災研究所 多々納裕一先生、准教授 畑山満則先生には、御指導・御助言を頂きました。ここに、重ねて御礼を申し上げます。また、洪水予測に適用した非線形フィルタリング手法の一つである **Particle Filter** を淀川水系に適用するにあたり、御助言を頂いた京都大学大学院教授 立川康人先生には、重ねて御礼申し上げます。また、学位取得に際し、直接的な指導はないものの、絶えず激励をして頂いた舞鶴工業高等専門学校名誉教授 川合茂先生、京都大学教授 防災研究所 中北英一先生、舞鶴工業高等専門学校教授 三輪浩先生には、重ねて御礼を申し上げます。

本研究は前述したように、滋賀県、兵庫県、国土交通省から発注された業務の一部であり、論文の執筆・発表を快諾して頂いた滋賀県職員 小根田康人氏、饗庭啓良氏、辻光浩氏、瀧健太郎氏、北村祐二氏、中西宣敬氏、手塚聡氏、中島敏雄氏、前田善一氏、七里豊伸氏、岡田裕行氏、永吉晃一氏、国土交通省中国地方整備局職員 川島明昌氏、河内敏雄氏、国土交通省近畿地方整備局職員 森田宏氏、志賀浩幸氏、酒井 伸一氏、井川智博氏には深く感謝申し上げます。

本研究の細部に亘って、私と密接にかつ一緒に研究を進めてきた当時大阪本社水システ

ム部 杉浦正之氏（現在（株）アスコ）、当時水システム部 花房大輔氏（現在滋賀県南部土木事務所）には、言い尽くせない程の御支援を賜りました。ここに、厚く感謝を申し上げます。さらに、本研究の一部は、会社の同僚である由良英作氏、大八木豊氏、橋本将明氏、辻倉裕喜氏、佐々木昌俊氏、村岡治道氏、坂井広正氏、深草新氏、原田翔太氏とともに築いた成果の結集であります。ここに、御支援を頂いた諸兄に、心より感謝申し上げます。また、学位取得の再挑戦を促し、激励して頂いた後藤雅之氏、小滝訓一氏、澤田典靖氏、森川浩氏には、御礼を申し上げます。

入社以来、仕事を継続しながら、学位取得のための研究を行うことを強く勧めて頂いた山下幸弘氏、森本浩之氏には、重ねて心から御礼を申し上げます。また、一旦は諦めかけていた研究の再挑戦について、叱咤激励して頂いた東京本社長 兪朝夫氏、大阪本社技術統括部 井辻英雄氏には、ここに重ねて御礼を申し上げます。

妻 恭子、延明、香帆には、仕事と研究のために長年に亘り負担をかけ、時として我慢させてしまいました。しかしながら、妻・子供達の日々の生活での支えがあつてこそ、本論文をまとめることができたと認識しております。ここに、言葉では言い尽くせませんが、心から感謝申し上げます。また、父母、義父母をはじめとする兄弟、親戚の方々には、学位取得に御理解を示して頂くとともに、励ましのお言葉を頂戴しました。ここに厚く御礼申し上げます。

田中 耕司
2014 年 3 月