2013 年度　　博士論文

豪雨・浸水の時空間分布を推定する
指標化モデルに関する研究



KEIO MEDIA DESIGN

慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

廣井　慧

本論文は慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科に
博士 (メディアデザイン学) 授与の要件として提出した博士論文である.

廣井　慧

指導教員：

砂原 秀樹 教授	(主指導教員)
加藤 朗 教授	(副指導教員)
岸 博幸 教授	(副指導教員)

審査委員：

加藤 朗 教授	(主査)
岸 博幸 教授	(副査)
鷹野 澄 東京大学教授	(副査)
今村 文彦 東北大学教授	(副査)

豪雨・浸水の時空間分布を推定する
指標化モデルに関する研究

内容梗概

頻発する豪雨と浸水の被害を軽減するためには，その程度や影響の把握が重要となる．そこで降雨や河川水位の観測値から，豪雨と浸水の被災状況を把握するための情報として指標が用いられる．しかし観測点の数には限りがあり，広範囲に対して一律の観測値が提供されるため，提供される観測値や指標と，実際の豪雨と浸水の発生地点が異なる．また指標は，詳細な時間幅での生成を対象としていないため，その提供時間/更新間隔と，豪雨と浸水発生の時系列変化が異なる．その結果，観測値や指標と，実際の豪雨と浸水の発生箇所，指標の提供時間と実際の発生タイミングにずれが生じ，発生する豪雨と浸水について被災状況の把握が困難となる．

本研究では，豪雨と浸水の程度と，その影響を指標化するモデルを提案する．指標化モデルは，1) 観測機器の未設置地点における降水量や河川水位，浸水深の推定値を算出し，2) その推定値や，周囲の降雨と河川の状況，豪雨と浸水からの影響の受けやすさをもとにして，豪雨と浸水の時空間分布を推定する指標を生成する．1) で豪雨と浸水の空間分布を推定することで，観測点数の制限によって生じていたずれをなくす．また，2) で近似式を用いた推定と指標化をすることで，これまで難しかった即時性の高い豪雨と浸水の時間分布を推定する．はじめに，気象センサネットワークの雨量計から得られる降水量と，気象レーダシステムから得られる降水強度との線形近似式を導き，降水量の推定値を算出する．浸水深は，河川監視ネットワークの河川水位や，本研究で開発設置した水位計から得られる市街地での浸水深を用いた線形近似式から推定する．次に，算出した推定値，周囲の雨量計，水位計での観測値，環境要因（地形や浸水危険箇所からの距離）をその値に応じて数段階に分類する．それぞれの値の組み合わせに応じて，豪雨と浸水から人々が受ける影響を指標とする．

生成した推定値と指標を，それぞれ実際の豪雨と浸水の観測値と比較したところ，高相関が確認できた．ただし推定値は，気象状況の激しい変動により，その精

度の低下が確認された．本研究では，推定値だけではなく，周囲の状況や影響の受けやすさを組み合わせることで実際の豪雨と浸水の観測値に近似した指標の生成を可能としている．提案した指標化モデルは，被災状況を把握する目的において，豪雨と浸水を推定する即時性の高い指標を生成できることが示唆された．また数校の高校において，指標生成に用いた推定値を利用して，危険回避行動に関わる防災教育を実施し，豪雨と浸水の危険の認識可能性についても調査した．さらに生成した指標を，被災地域の人々に情報提供するための検討を行い，提供タイミングの制御による遅延の改善と豪雨と浸水の発生規模に応じた提供範囲の制御の必要性や実現可能性について述べる．

キーワード

Sensor Networks，Disaster Manegement，Risk Communication，Weather Observation, Flood Monitoring，Linear Regression Model，Time-Space-based Inter-Calibration

慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

廣井　慧

An Indicator Model to Estimate Spatial and Temporal Distribution for Heavy Rain and Flooding

Abstract

The purpose of this research is to predict the scale and impact of damage caused by heavy rain and flooding. Existing monitoring systems observe rainfall and the water levels of rivers and the inundation depth in cities, and create their risk indices. The installation of an observation point is insufficient for the estimation of their scale and impact. Therefore, due to this insufficiency, we used the observation values of a monitoring point as a substitute for the values of different areas. However, the values have a discrepancy between their observation point and the location of the actual damage. The calculation of the risk indices requires a time interval; thus, there is a discrepancy between the temporal resolution and the actual timing at which the damage occurred. These discrepancies make it difficult to estimate such damage.

This research proposes an indicator model that provides the scale and impact adapted from the damage caused by heavy rain and flooding. The indicator model can calculate the estimated values of rainfall, water levels, and inundation depths at locations without monitoring stations, and create indicators to estimate the spatial and temporal distribution of the damage based on the estimated values, meteorological situation, river flow, and the vulnerability of the area to sustain damage. The following are the major features of the model: 1) The spatial distribution can be estimated, which eliminates the discrepancy caused by the insufficiency of the monitoring points. 2) The estimated values determined by using an approximation formula and the indicator method can estimate the temporal distribution of heavy rain and flooding with high immediacy.

Integration of some factors creates spatial and temporal distribution. First, we derive a linear approximation formula, which calculates the values estimated from

the rain gauges of meteorological sensor networks and precipitation intensity of a meteorological radar system. The formula estimates the inundation depths from river monitoring networks and observation networks, which were developed and implemented specifically for this research. Next, the estimated values are classified into several levels according to the risk indices and environmental factors, such as terrain conditions and the distance from the vulnerable area. Integrating each level provides the possible impact on the people in the areas with a risk of flooding.

The estimated values and indicators were implemented and evaluated by using our indicator model. The indicators correlated significantly well with the actual damage in comparison to the observation values. However, the local weather conditions reduced the accuracy of the estimated values. The method that was used to integrate the estimated values and vulnerable factors provided adequate approximated indicators. The proposed indicator model showed that the indicators estimate heavy rain and flooding with high immediacy when considering the purpose of monitoring disaster damage. A scheme that utilizes the indicators had high efficiency and was used to provide disaster prevention awareness to students at several high schools. Furthermore, we discuss a method and its implementability to provide our indicators to the public in a timely fashion. Additionally, our indicators require functions, a timing control to improve time delays, and an autonomous area control to determine the extent of damage.

Keywords:

Sensor Networks, Disaster Manegement, Risk Communication, Weather Observation, Flood Monitoring, Linear Regression Model, Time-Space-based Inter-Calibration

Graduate School of Media Design, Keio University

Kei Hiroi

目　　次

第 1 章　序論 **1**

1.1. 本研究の背景 1

1.2. 指標の重要性とその問題 2

1.3. 本研究の目的 3

1.4. 本論文の構成 4

第 2 章　水害の概要と災害情報の重要性 **5**

2.1. 水害の概要 5

2.1.1　本研究で対象とする水害 5

2.1.2　降雨の発生 5

2.1.3　豪雨発生のしくみ 6

2.1.4　豪雨による氾濫の発生 7

2.1.5　氾濫の影響による浸水の発生 10

2.1.6　日本で発生する浸水の特徴 13

2.2. 豪雨と浸水における災害情報の概念 14

2.2.1　災害情報の役割 14

2.2.2　災害情報の種類 14

2.2.3　情報生成と提供の流れ 14

2.3. 観測値の生成 16

2.3.1　観測値の重要性 16

2.3.2　降雨や河川，浸水の観測 17

2.3.3　降雨の観測網 18

2.3.4　河川水位，浸水深の観測網 19

2.4. 既存研究の観測値と指標 19

2.4.1 豪雨に関する観測値 19
2.4.2 浸水に関する観測値 20
2.4.3 豪雨の指標 24
2.4.4 浸水の指標 25
2.4.5 既存の観測値と指標のまとめ 26
2.5. 本研究で取り組む指標に関する課題 26
2.5.1 指標の提供時間と実際の発生タイミングのずれ 26
2.5.2 観測値，指標の提供範囲と，豪雨と浸水の発生箇所のずれ . 27
2.5.3 時間的，空間的ずれによる影響 28
2.6. 本研究で目指す指標の生成 29

第 3 章 豪雨と浸水の時空間分布を推定する指標と指標化モデルによる生成 31
3.1. 指標化モデル 31
3.1.1 指標化の目的 31
3.1.2 指標化モデルによる指標生成の流れ 32
3.2. 指標化モデルの構成 33
3.3. 豪雨とその指標 34
3.4. 豪雨に関する指標の妥当性と即時性 35
3.4.1 豪雨に関する指標の妥当性 35
3.4.2 豪雨に関する指標の即時性 37
3.5. 豪雨に関する指標の生成手法 37
3.5.1 豪雨に関する指標生成の流れ 37
3.5.2 豪雨を決定する要因とその閾値 38
3.5.3 指標の生成 39
3.6. 浸水とその指標 46
3.7. 浸水に関する指標の妥当性と即時性 46
3.8. 浸水に関する指標の生成手法 47
3.8.1 浸水に関する指標生成の流れ 47
3.8.2 浸水を決定する要因とその閾値 48
3.8.3 指標の生成 51

第 4 章　指標化モデルによる指標とその情報提供の評価　56
4.1. 豪雨に関する指標の評価 56
4.1.1 評価に用いた観測値 56
4.1.2 豪雨の推定値の評価 58
4.1.3 指標の評価 65
4.2. 浸水に関する指標の評価 68
4.2.1 浸水に関する指標（浸水発生有無）の評価 68
4.2.2 浸水に関する指標（浸水発生後）の評価 73
4.3. 指標化モデルの評価 75
4.3.1 豪雨に関する指標の妥当性 75
4.3.2 浸水に関する指標の妥当性 79
4.4. 指標の生成と認識に対する検証 81
4.4.1 防災教育の実施 81
4.4.2 降雨情報の提供による認識の変化 82
4.4.3 防災教育の試行結果と課題 85
4.5. 生成した指標の提供手法の検討 89
4.5.1 被災地域への情報提供 89
4.5.2 災害情報の提供における問題 90
4.5.3 情報共通インタフェース 91
4.5.4 情報提供タイミングの比較 93
4.6. 評価の結論 94

第 5 章　結論　96
5.1. 本研究の成果 96
5.2. 本研究に関する今後の課題 97
5.2.1 誤検知，過検知時の処理 97
5.2.2 高密度な観測の実現 98
5.3. 指標の活用に向けて 98
5.3.1 指標の情報提供 98
5.3.2 指標を提示する表現手法 99

5.3.3　被害拡大時の対応 99
5.4. 今後の展望 100
5.4.1　本研究の適用条件 100
5.4.2　他分野への適用 100

付録 A　豪雨と浸水によって発生する影響　118

付録 B　豪雨と浸水によって発生する影響とインディケータ，指標の対応　121

図　目　次

2.1　積乱雲の生成過程 6
2.2　線状降水帯による豪雨 7
2.3　短時間強雨発生のしくみ 8
2.4　河川の構造 9
2.5　外水と内水 9
2.6　外水氾濫 10
2.7　内水氾濫 10
2.8　流入量と流出量の関係 12
2.9　豪雨と浸水発生時における災害情報の生成と提供フロー 17
2.10 降雨，河川，浸水の観測網 18
2.11 雨量計，気象レーダの観測値 20
2.12 河川水位の観測値 21
2.13 警報，避難情報の提供例 25
2.14 既存の観測値，指標の課題 29
2.15 本研究で目指す指標の生成 30

3.1　指標による被害の軽減 32
3.2　指標化モデルによる指標生成の流れ 33
3.3　研究対象領域と観測点 34
3.4　提案する指標化モデルの構成 35
3.5　上空観測網と地上観測網 36
3.6　豪雨に関する指標生成の流れ 39
3.7　推定値の生成 41
3.8　雨量計から算出する対象地点，近傍の降水量と現況，危険の接近 . . 43

3.9 気象レーダから算出する上空，周辺の降水強度と危険の接近，継続 44
3.10 浸水に関する指標生成の流れ 48
3.11 観測値から生成する浸水に関する指標の生成 49
3.12 対象領域の離散平面への分割 53
3.13 8 近傍ラプラシアンフィルタによる高度の重み付け 54

4.1 評価に使用した雨量計の設置分布 59
4.2 A 群：カーネル密度推定を用いて求めた雨量係数 μ の分布 60
4.3 B 群：カーネル密度推定を用いて求めた雨量係数 μ の分布 61
4.4 C 群：カーネル密度推定を用いて求めた雨量係数 μ の分布 61
4.5 A 群：対象地点における降水量の推定値 62
4.6 B 群：対象地点における降水量の推定値 63
4.7 C 群：対象地点における降水量の推定値 63
4.8 A 群：対象地点と近傍の降水量の散布図 66
4.9 B 群：対象地点と近傍の降水量の散布図 66
4.10 C 群：対象地点と近傍の降水量の散布図 67
4.11 観測値と豪雨に関する指標の関係 69
4.12 河川水位と推定値の比較 70
4.13 観測値と浸水に関する指標の関係（浸水発生有無） 72
4.14 浸水観測機器の構成 74
4.15 8 近傍ラプラシアンを用いて分類した土地の高度 75
4.16 観測値と浸水に関する指標の関係（浸水発生後） 76
4.16 観測値と浸水に関する指標の関係（浸水発生後）（続き） 77
4.17 目的とする防災教育 82
4.18 防災教育の教育項目 83
4.19 聞き取り時に用いた写真の例 85
4.20 聞き取りの質問，回答例 86
4.21 情報共通インタフェースによる情報提供タイミングの制御 92

表　目　次

2.1 降雨と水害の関係 11
2.2 豪雨と浸水に関する主な災害情報 15
2.3 豪雨と浸水に関する観測値と指標 22

3.1 豪雨に関する指標 36
3.2 指標の生成タイミング 37
3.3 豪雨に関する指標とインディケータ関数 45
3.4 浸水に関する指標 46
3.5 浸水に関する指標とインディケータ関数 55

4.1 評価に用いた降雨日 56
4.2 雨量係数 μ の平均値 59
4.3 観測値と推定値の相関 62
4.4 本研究の推定値と解析雨量の相関係数の比較 65
4.5 観測値と近傍の降水量の相関 65
4.6 観測値と推定値の相関 71
4.7 観測値と豪雨に関する指標の比較 78
4.8 観測値と浸水に関する指標の比較 80
4.9 高校生に提示した数値情報と降雨状況の説明 84
4.10 高校生に提示する情報とタイミング 85
4.11 教育項目 A と B で正しく表現できた被験者数 88
4.12 教育項目 C で正しく回答できた被験者数 88
4.13 選定した受信機器と情報形式 93

A.1 豪雨と浸水によって発生する影響 118

B.1 豪雨の影響，インディケータ，指標の対応 121
B.2 浸水の影響（浸水発生の有無），インディケータ，指標の対応 . . . 130
B.3 浸水の影響（浸水発生後），インディケータ，指標の対応 131

第1章
序　　論

1.1. 本研究の背景

水は人間の生活に不可欠な資源である．太古から人々は降雨や河川の水資源を利用して都市文明を築いてきた．しかし，水は人間社会に利益を与えると同時に，多くの危険をもたらす．豪雨や浸水のような水害は，街を壊滅させ，数千人規模の犠牲者を出すことも少なくなかった [1]．水の恩恵を受けながら水害から人間社会を守るため，人々は治水による水害の制御を行い続けてきた．紀元前 4300 年頃には既に水害から人間生活を守るための貯水池の建設や，護岸工事が行われた [2] [3]．こうした治水は人々の住居，田畑を守り，水害から人命を守る重要な役目を果たしている．特に近代になってからは，建築技術の発達により治水技術が飛躍的に進歩し，水害による犠牲者の数は大きく減少している．

治水は有効な対策ではあるものの，その被害軽減には限界がある．まず，ダムや堤防のような人工的な建造物による制御は，自然環境に大きな負荷がかかる．さらに，こうした人為的な制御が難しい大きな規模で豪雨や浸水が発生した場合，近隣都市への被害がより拡大する可能性がある．つまり，大規模な豪雨や浸水が発生すると，これまで行われてきた治水対策では被害の発生を抑えきれない可能性が高い．

このような状況で豪雨と浸水の発生が大規模化すると予測されており，その影響を軽減，防止するために早急な対策をとることが求められている [4] [5]．その対策のひとつに，情報提供が挙げられる [6]．被災する可能性のある地域にいる人々が災害情報を適切に知ることで，周囲の被災状況やその危険を把握し，とるべき行動の判断が可能となる．水害は，地震や火山のような他の災害に比べ，予測から発生までの時間が比較的，長く対応が取りやすい．そのため，適切な情報によっ

て適切な危険回避行動をとることができれば，被害の軽減，防止に繋がると考えられる．

1.2. 指標の重要性とその問題

降雨は，日常的な自然現象であるが，時として大きな影響をもたらすことがある．急激な降雨や長時間の降雨は，道路の冠水や河川の氾濫を起こし，死者が発生するような大きな被害に繋がる．水害は，災害の中で最も累計死者数を多く出す災害である [7] [8]．これまで被害軽減に向けて，様々な側面から対策が行われてきた [9]．近代では，堤防の整備等の治水の効果により水害自体の発生数は減少している．さらに水害が発生した際の被害軽減を目指して，情報提供に関する多くの取り組みが行われてきた．テレビやインターネットから人々に災害情報を提供するサービスやシステムが数多く生まれるとともに，PC や携帯電話のように個人で情報のやり取りが可能な情報機器が普及し災害情報を入手するための環境が整いつつある [10]．しかし，治水や情報提供等の取り組みが行われているにも関わらず，水害による犠牲者は，毎年一定数以上出続けている [1] [11]．

水害は，降雨の大きさがある条件を超えたとき，発生する．降雨の大きさを知るために，観測値の生成，提供が行われる．また観測値をもとに，激しい降雨や河川水位の上昇とその影響を示す警報や避難情報が生成，提供される．豪雨に繋がる降雨の条件は，その地点の降水量や周囲の気象状況によって異なる．また豪雨による浸水の発生は，河川水位だけでなく，周囲の降雨，河川の状況や地形に大きく影響を受ける．本研究では，観測値に加えて，水害に繋がる様々な要因を考慮し，豪雨と浸水の影響を算出した値を指標と呼ぶ [12]．

被害軽減には，被災状況の把握が有効となる [13]．観測値は，観測点とその周辺の豪雨，浸水の状況を示すが，観測点から離れた地点で発生する豪雨と浸水の状況を知ることは難しい．そこで観測機器の未設置地点では，豪雨と浸水の影響を推定する指標化が重要となる．しかし，既存の観測値は観測点数に限りがあるため，広い範囲の地域に対し，1 地点の観測値が利用される．同様に観測値をもとにした指標も広い範囲の地域に対し生成される．そのため，提供される観測値や指標と，実際の豪雨と浸水の発生地点が異なる．また指標は，詳細な時間幅での生

成を対象としていないため，その提供時間/更新間隔と，豪雨と浸水発生の時系列変化が異なる．その結果，観測値や指標と，実際の豪雨と浸水の発生箇所，指標の提供時間と実際の発生タイミングにずれが生じ，被災状況の把握が困難となる．

1.3. 本研究の目的

本研究では，被災状況の把握が可能な指標を生成することで，人々が適切な危険回避行動をとり，豪雨と浸水に対して柔軟に対応できる社会の実現を目指す [14]．本研究の目標は，豪雨と浸水の時空間分布を推定する指標とその生成を行う指標化モデルの提案である．指標化モデルとは，降水量や河川水位，浸水深等の観測値から，豪雨と浸水の程度やその影響を推定するモデルと定義する．水害のうち将来，被害発生の増加が懸念される豪雨と浸水による影響に着目する．既存の情報提供環境としてインターネットを活用し，被災地域の人々や防災組織へ提供するため，それぞれの影響の大きさを指標として算出することを目指す．指標によって，ある地点で豪雨や浸水が発生したとき，その影響の程度を知ることが可能となる．

生成には，推定値の算出と指標の生成の 2 つの手法を用いる．はじめに，観測点以外の降雨や河川，浸水の状況を知るため，観測機器の未設置地点における降水量や河川水位，浸水深の推定値を算出する．次に，豪雨と浸水の時空間分布を推定する指標を生成する．被災する地域を格子分割し，各格子で発生する影響を推定する．また，時間のずれを解決するため，観測値や指標の提供時間/更新間隔と実際の時系列変化が異なる問題に対し，詳細な時間幅での推定を行う．豪雨と浸水では発生要因が異なるため，それぞれの要因に基づき指標を生成する．豪雨の指標は，降雨の激しさが要因となるため，降水量の推定値をもとに，時空間分布を生成する [15]．浸水は，河川水位，浸水深，周囲の降雨，環境要因等，複数の要因に影響を受ける．そのため，河川水位の推定値，浸水深の観測値，降水量の観測値，土地の高度，河川からの距離等をもとに指標を生成する [16] [17] [18]．生成した指標の妥当性を評価するとともに，指標を用いて危険の認識可能性を調査する [14]．このような豪雨と浸水の影響に関する指標化モデルの提案を本研究の目標とする．

さらに，生成した指標を被災地域へ提供する手法を考える．既存の情報提供環境が持つ情報提供時の遅延を改善し，生成した指標を被災地域の人々に提供するための手法を検討する [19] [20] [21]．適切な地域への迅速な情報提供を実現するため，提供タイミングの制御による遅延の改善と，豪雨と浸水の発生規模に応じた提供範囲の制御を行うために，情報提供の共通インタフェースを提案する [22] [23] [24]．

なお，本研究で扱う指標は「危険がある」状態を示す．気象現象の変化が起き，豪雨と浸水による被害が発生する可能性のあるときを,「危険がある」状態と定義する．気象現象が終息すると，豪雨の原因となる降雨はなくなり，浸水発生の可能性は減少していく．このような状態は,「危険がなくなった」や「危険がない」状態とする．本研究では，被害軽減に関わる重要性の高さから,「危険がある」状態のみを扱い,「危険がなくなった」や「危険がない」状態は，対象としない．

1.4. 本論文の構成

本論文の構成は，以下のとおりである．第 1 章では，本研究で対象とする水害の定義と，頻発する水害に対して被災状況を把握するための指標化手法の提案を本論文の目的と設定した．第 2 章で，被災地域の人々に提供されている情報を調査し，その情報のもつ課題をまとめた．これらの調査から必要とされる要件を整理し，指標化における方針を策定した．第 3 章で，指標化手法の提案を行う．第 4 章で生成した指標化モデルを用いて生成した推定値と指標の評価について述べる．また，指標を被災地域の人々に情報提供するにあたり，必要な提供手法について議論する．第 5 章では，各章で議論してきた事項について，総評し残された課題についてまとめる．

第2章
水害の概要と災害情報の重要性

2.1. 水害の概要

2.1.1 本研究で対象とする水害

災害とは社会の機能が日常性を失うことである．自然の影響によってもたらされる災害だけでも水害，火山災害，地震災害のような様々な脅威が存在する．水害の要因となる気象現象として台風やハリケーンによる豪雨，梅雨前線のような気象変化による豪雨，突発的に発生する集中豪雨，短時間強雨等が挙げられる．また，その影響として浸水の発生，ダムの崩壊，土砂災害のような被害が起きる．

水害は，地震災害のような突発的な災害と異なり，季節性の気象現象によって毎年必ず発生する災害である．その累計の被害者数は，各災害の中で最も多い [7] [8]．さらに，2000 年以降は地球温暖化の影響により，大規模な浸水が各地で起きており，今後もその発生数の増加が見込まれている [4]．そのため，各災害のうち，最も対策が必要であると考え，本研究では，豪雨とその影響で発生する浸水を対象とする．

2.1.2 降雨の発生

激しい降雨のような気象現象は，発達した積乱雲によってもたらされる [25]．図 2.1 に積乱雲の形成過程を示す．大気の成層が対流の起きやすい不安定な状態となったとき，積乱雲の形成条件は整う．不安定な大気は，(a) 地表近くの温かく湿った空気の上昇流が発生させる．上昇流はまわりの大気の水蒸気を集め，積乱雲の中に降水粒子を作る．こうして形成された積乱雲は，まわりの大気中の水蒸

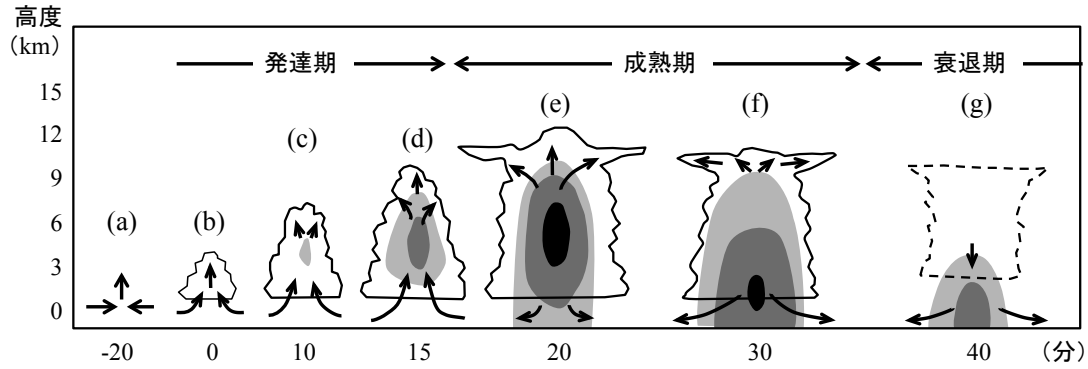


図 2.1 積乱雲の生成過程（[26] をもとに作成）

気を吸い込みながら発達を続け，さらに多くの降水粒子を貯め込んでいく．(e) 上昇流が成長した降水粒子の重さを支えきれなくなったとき，積乱雲中の降水粒子は，急激に地面に向かって落下を始め雨粒となる．落下する雨粒はシャワー性の強い降雨をもたらし，単独の積乱雲だけで数十 mm の降雨，複数の積乱雲が形成された場合は 100mm/h 以上の降雨となる．形成された単独の積乱雲の大きさは数 km〜数十 km であり，複数の積乱雲が重なると広範囲に渡って降雨が起きる．(g) 主な降水粒子が地上に落ちきると，雲全体が弱い下降気流となり，雲として消滅する．ここまでの形成から消滅までにかかる時間は 1 時間程度となる．

2.1.3 豪雨発生のしくみ

豪雨と集中豪雨

本研究では，豪雨を災害の発生が懸念される激しい降雨と定義する．豪雨は，強い降雨を差す言葉で災害の発生を含んだ現象に使用されることが多い [27]．集中豪雨は，狭い地域で数時間から数日にかけて，集中して起きる豪雨を指す．両者とも，範囲や降水量にはっきりした定義はないが，激しい雨が数時間以上にわたって続く降雨である．

豪雨や集中豪雨は，梅雨前線や寒冷前線，台風，熱帯低気圧，線状降水帯によって起きる [28]．特に線状降水帯は，日本で発生する集中豪雨の要因の 4 割を占める．

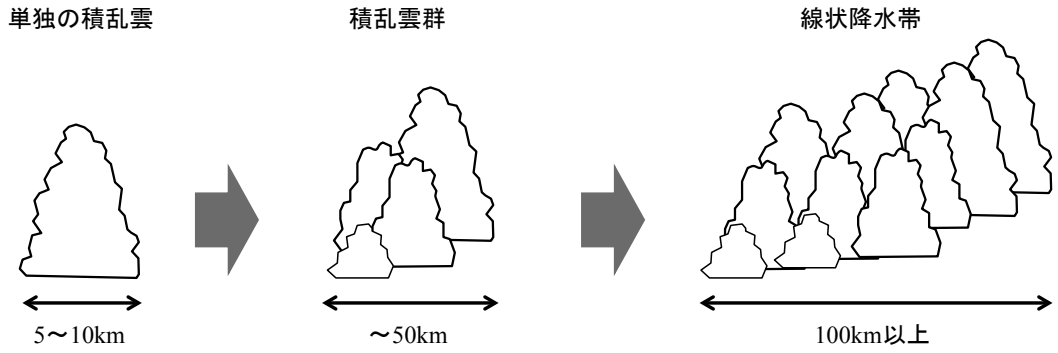


図 2.2 線状降水帯による豪雨（[29] をもとに作成）

図 2.2 に線状降水帯による豪雨のしくみを示す．単独の積乱雲が同じ場所に停滞し，次々と発生，発達を繰り返し，長さ数十 km 程度の積乱雲群を形成する．この積乱雲群がいくつも重なり線状降水帯として豪雨を降らせる．線状降水帯は，狭い地域に数百 mm の降雨をもたらす集中豪雨となる．豪雨や集中豪雨の発生は，数時間から 1 日程度前に予測が可能である．

短時間強雨

短時間強雨は，短い時間に狭い地域で降る豪雨を指す．その発生は，突発的であることが多い．短時間強雨は，地形性の大雨がその大きな要因であると考えられている．図 2.3 に示すように，ヒートアイランド現象により暖められた地表面に向かって海面等から冷たい空気が流れ込むことで上昇気流が発生する [30] [31]．この上昇気流が積乱雲を形成し，豪雨となる．短時間強雨は狭い地域に積乱雲が急速に発達し起きる現象であるため，積乱雲が形成される前の予測が難しい．

2.1.4 豪雨による氾濫の発生

河川の構造

豪雨が河川に降り注ぎ，河川の水があふれる現象を氾濫という．河川の構造を，図 2.4 に示す．河川は主要河川である本川と支川に分けられる．氾濫は，本川の川

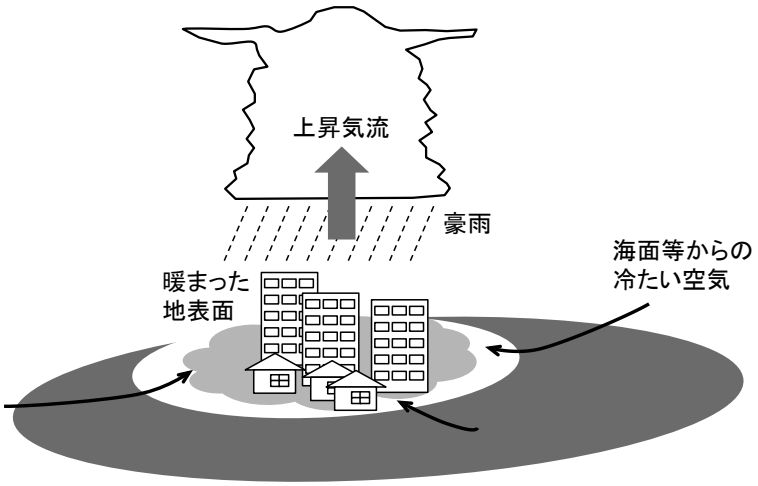


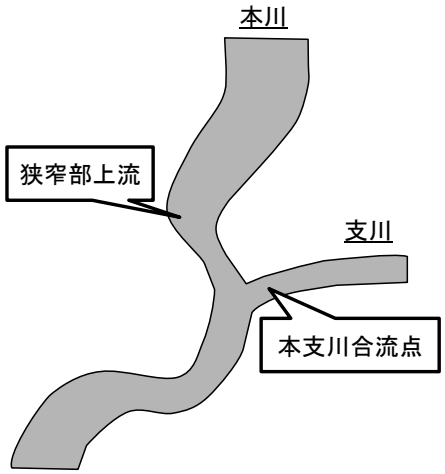
図 2.3 短時間強雨発生のしくみ（[32] をもとに作成）

幅が急に狭くなる狭窄部の上流，支川から本川へ水が流れ込む合流点で発生しやすい．河川で発生した氾濫の形態を図 2.5 に示す．堤防の外側の本川の水を外水，市街地等の堤防内側の土地にある水を内水と呼ぶ．外水によって起きる氾濫は外水氾濫，内水によって起きる氾濫は内水氾濫として，氾濫の発生形態が区別される [33]．都市域で豪雨が生じると，はじめに内水氾濫が発生し，さらに豪雨が続くと外水氾濫の発生に繋がる．

外水氾濫

外水氾濫は河川等で水があふれ，徐々に浸水域，浸水深が増加する現象を指す [27]．外水氾濫が発生するしくみを図 2.6 に示す．外水氾濫は本川で発生する氾濫を意味する．河川に降り注いだ大量の降雨は，河川の流れによって下流へと流される．河川へ降り注ぐ降水量や上流からの流入量が河川の流出量を上回った場合，水位が上昇する．河川が増水し水位が堤防を越えると，河川から大量の水が流れ出て，外水氾濫となる．

外水氾濫により流れ出た水は，破壊力の大きな流速となることも多く，多数の死者や家屋の流失，全壊を引き起こす [34]．市街地での浸水による被害も大きいが，地形の要因が加わるとさらに被害が大きくなる．1983 年の島根豪雨では最大浸水



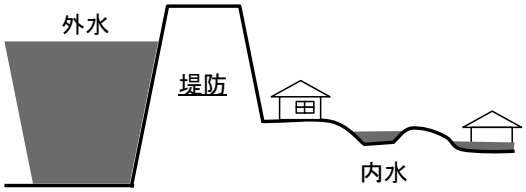


図 2.4 河川の構造（[27] をもとに作成） 図 2.5 外水と内水（[27] をもとに作成）

深 5m 近くの浸水が発生し，2011 年の平成 23 年台風第 12 号では那智川等複数の河川の氾濫により，多くの死者が発生した [35]．なお，外水氾濫よる水の力は非常に大きく，堤防の破壊を招く．本研究では，破堤をする前の氾濫被害を対象とする．

内水氾濫

内水氾濫は降水量に対して小河川や下水道等の処理能力が追いつかず，浸水域，浸水深が増加する現象を指す [27]．市街地の中小河川の氾濫や，本川で増水した水が支川に逆流し，起こる浸水が内水氾濫に含まれる．内水氾濫が発生するしくみを図 2.7 に示す．都市に降り注いだ降雨は，都市の側溝から下水道のような排水路へと流れていく．降水量が多く，排水機能が追いつかなかった場合，流入した降雨を排水することができず，降った雨は市街地に溜まり，浸水が発生する．

内水氾濫は，地面への雨水の浸透が少ない都市域に発生しやすい [36] [37]．草地，田畑の市街地化による整地，路面舗装が都市域の排水能力を低下させ，内水氾濫の発生を誘発させると考えられている．特に 2000 年に入ってから，短時間強雨という短い時間に大量の降雨が発生する気象現象が着目されるようになった．短時間に流出量を超える大きな降水量が降る短時間強雨は，多くの都市で数多くの内水氾濫を発生させる要因となっている．

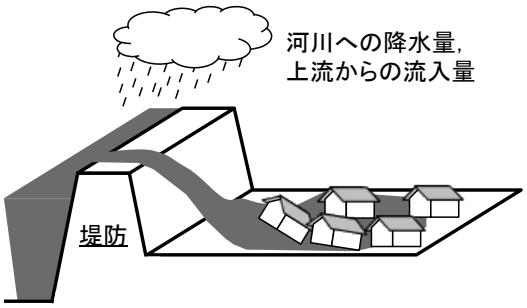


図 2.6 外水氾濫（[27] をもとに作成）

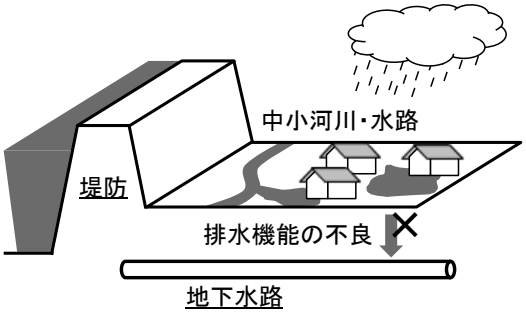


図 2.7 内水氾濫（[27] をもとに作成）

2.1.5 氾濫の影響による浸水の発生

豪雨と浸水の関係

豪雨と浸水発生までの流れを述べる．本研究では浸水を，豪雨によって市街地が水に浸かる現象と定義する．豪雨により氾濫が発生すると，河川からあふれた水は市街地で浸水する．豪雨の程度に応じて，浸水をはじめとする水害が発生する可能性が上がる．水害の要因となる降雨の強さや降り続く時間の目安として，日本の都市域における降雨と水害の関係を表 2.1 に示す [38]．1 時間雨量が 20mm/h を超えると小規模な河川や水路の溢水が起き，水害へと発展する発生する可能性が高くなる．さらに降水量が多くなると，大規模な水害へと繋がる．なお，表 2.1 で使われている降雨は 1 時間降水量として平均化された降水量のみを示している．

豪雨と氾濫は，必ずしも同地点で発生する現象ではない．河川の下流地域では降雨がなく，上流で発生した豪雨による水が，下流に一度に流れて下流地域での氾濫となった事例は数多い．このように豪雨の発生箇所と氾濫や浸水の発生箇所が異なる場合には，周辺地域の人々は氾濫の発生兆候に気がつきにくく，人々が河川付近に留まってしまうことで大きな被害に繋がる可能性も高い．

表 2.1 降雨と水害の関係（[38] より）

1 時間降水量 (mm)	予報用語	人への影響	屋外の様子	災害発生状況
10 以上 ～ 20 未満	やや強い雨	地面からの跳ね返りで足下が濡れる．傘をさしていても濡れる	地面一面に水たまりができる	この程度の雨でも長く続くときは注意が必要
20 以上 ～ 30 未満	強い雨			側溝や下水，小さな川があふれ，小規模の崖崩れが始まる
30 以上 ～ 50 未満	激しい雨		道路が川のようになる	山崩れ・崖崩れが起きやすくなり危険地帯では避難の準備が必要．都市では下水道から下水管から雨水があふれる
50 以上 ～ 80 未満	非常に激しい強い雨	傘はまったく役に立たなくなる	水しぶきであたり一面が白っぽくなり，視界が悪くなる	都市部では地下室や地下街に雨水が流れ込む場合がある．マンホールから水が噴出する．土石流が起こりやすい．多くの災害が発生する
80 以上 ～	猛烈な雨			雨による大規模な災害の発生するおそれが強く，厳重な警戒が必要

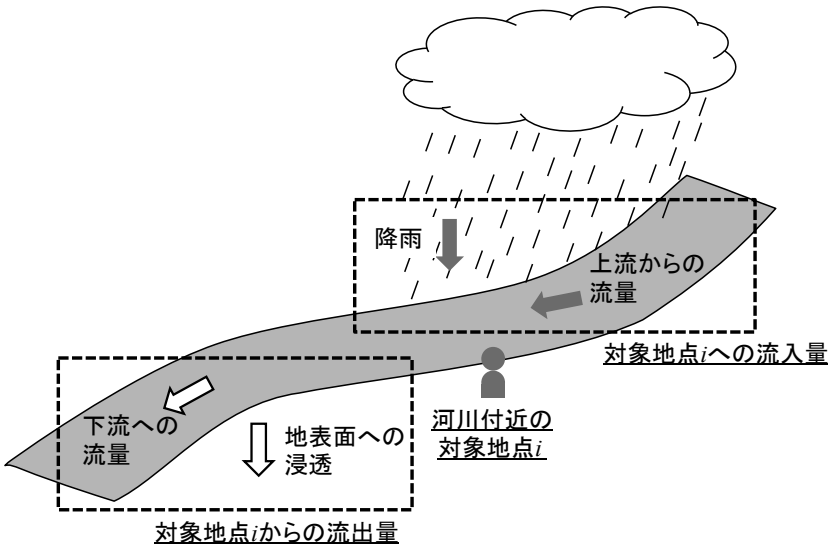


図 2.8 流入量と流出量の関係

外水氾濫による浸水と内水氾濫による浸水

浸水は，都市に排水機能以上の降水があったとき発生する．図 2.8 に浸水が発生するしくみを示す．河川付近の対象地点 i から見て，上流の降雨や河川の流量は流入量となる．また，河川の下流への流量や地表面へ浸透する水は流出量となる．この流出量は都市の排水機能の能力によって決まる．氾濫や浸水は，流入量が都市の流出量を上回ったとき，発生する．下水道の処理能力のような都市の排水機能を上回る降雨が起きたとき，河川の水があふれ，市街地の道路に水が溜まり浸水となる．

浸水の発生は，家屋や家財等の物的被害，人命の損失のような人的被害を招く．外水氾濫による浸水と内水氾濫による浸水では，発生する被害が異なる．外水氾濫では，数 m に及ぶ浸水で家屋全体が水に使ってしまう事例も少なくない [39]．さらに家屋の土台石が脆弱であった場合，氾濫水によって浮力が生じ，家屋の流出が起きる．氾濫水は，容易に家屋を押し流し破壊する．また，氾濫水の激しい流れは，家屋や家財が流れ人への被害をもたらす．外水氾濫の浸水から避難することが困難であった場合，深い浸水深や急な流れによって人命の損失が生じる．

内水氾濫では，氾濫水の流速は外水氾濫に比べ穏やかであり，主に床下浸水，床

上浸水により家屋や家財が水に浸かる被害が多い．そのため，土嚢や防水扉により建物を氾濫水から遮断する対策が有効とされる．しかし，穏やかな流れの浸水であるとはいえ，人的被害が発生した事例もある．地下施設や立体交差式の下を通るアンダーパスのような周囲より低く水が流れ込みやすい場所では，室内や車両等へ閉じ込められ生命の危機に及ぶ．そのため，内水氾濫による浸水であっても，家屋，家財の防御策とともに，人命に対する安全策も講じる必要がある．

浸水は，市街地で起きるため人々の生活に大きな影響を与える．流速の大きい浸水が発生すると，浸水深 0.2m 程度でも歩行が不可能になる．地面から 0.2m が濁った氾濫水に浸かると，河川と道路の境目が判断できなくなり，河川や水路へ落下して流されてしまう被害もある．また，道路の状況を目視することができず，浮き上がったマンホールへの落下する被害も多く発生している．さらに浸水深が 0.5m を上回ると，成人の膝上まで水に浸かる状況となり，避難行動には大きな危険が伴う．避難所までの歩行等が危険な状態となった際には，生命を守る最低限の行動として，自宅や隣接建物の 2 階等へ緊急的に避難する等の行動をとる必要がある．

2.1.6 日本で発生する浸水の特徴

日本の国土は狭く山地が多い急峻な地形である．河川は他の国々の河川と比べ，川幅は狭く急勾配な形状を有している．そのため日本と他の国々の河川を比較すると，河川の水が急速に下流へと流れ，氾濫や浸水が起きやすいという特徴がある．特に豪雨が発生した際には，流量が大きくなる．日本の河川は，豪雨時の河川の最大流量と，渇水時の最小流量の比を表す河況係数が非常に大きい．日本では，筑後川の河況係数が 8,671，利根川が 1,782 であり，アメリカ合衆国中東部を流れるオハイオ川が 319，スペインとフランスを流れるガロンヌ川が 167，アフリカ大陸東北部を流れるナイル川が 30 となっている [40]．

一方で，治水の歴史は古く，大規模な降雨に対して対応できる排水機能を構築してきた．特に近代以降，日本は護岸工事や堤防の構築に力を注いでおり，数々の豪雨に耐久性のある都市となった．2006 年アメリカでのハリケーン・カトリーナ水害，2011〜2012 年のタイ大洪水のような世界的に大規模な浸水は，日本国土で

は発生していない．また，降雨がなくなった後も都市に水がたまり続けることもなく排水が早い．復旧までの時間が他の国に比べ短いことも特徴となる．つまり，日本で発生する浸水の特徴に応じた対策を行うためには，情報提供が対策の重要な柱となる．

2.2. 豪雨と浸水における災害情報の概念

2.2.1 災害情報の役割

豪雨と浸水の発生時には一般の人々の危険回避を促すために，降雨や河川，浸水に関する観測値をはじめとする災害情報が提供される．災害情報を知ることで，降雨と河川の状況やその影響を把握することができる．状況把握は，豪雨と浸水に対してとるべき行動の判断を可能にする有効な手段となる．つまり災害情報から降雨と河川の状況やその影響が把握でき，被害の軽減，防止に繋がると期待できる．

2.2.2 災害情報の種類

豪雨と浸水の発生前と発生時に使用される災害情報には，降雨や河川，浸水の観測値，予測値，警報，避難情報がある．表 2.2 に災害情報の種類を示す．観測値には降水量，河川水位，浸水深がある．観測値からは降雨や河川，浸水の状況を知ることができる．予測値は豪雨や河川の氾濫が発生する可能性，警報は，豪雨や氾濫の影響で危険が迫っているという知らせを指す．避難情報は，避難勧告や避難準備情報等の被害発生のおそれがあるとき，対象の地域からの立ち退きを求める情報をいう．

2.2.3 情報生成と提供の流れ

豪雨と浸水に関する災害情報は生成と提供の 2 つの過程を経て，被災地域の人々へと伝えられる [43] [44]．豪雨と浸水発生時における災害情報の生成と提供フロー

表 2.2 豪雨と浸水に関する主な災害情報（[41] [42] [43] をもとに作成）

対象	種別	情報名	内容
降水	観測値	降水量	一定時間に雨量計で観測される雨の体積の合計
		降水強度	気象レーダで観測される瞬間的な降雨の強さ
	予測値	降水量	降水量の観測値の予測される値
		降水強度	降水強度の観測値の予測される値
河川	警報	大雨に関する気象情報	警報や注意報に先立って注意を呼びかける警報や注意報を補完する情報
		大雨注意報，警報	大雨等によって災害が起きるおそれ，重大な災害が起きるおそれのあることを呼びかける情報
		特別警報	重大な災害の危険性が著しく高まっている場合，最大限の警戒を呼びかける情報
		記録的短時間大雨情報	数年に一度程度しか発生しないような短時間の大雨の観測値，解析結果の周知
	観測値	河川水位	河川の基準面から水面までの高さ
	予測値	河川水位	河川水位の観測値の予測される値
	警報	指定河川洪水予報	河川の増水や氾濫等に対する水防活動のために発表される情報
		水位周知	指定した河川の水位が，定めた特別警戒水位に達したときに発表される情報
		水防警報	洪水または高潮によって災害が発生するおそれがあるとき，水防を行う必要がある旨の警告
避難情報		避難準備情報	避難行動に時間がかかる者を対象に人的被害発生の危険性が高まった状況で発表される情報
		避難勧告	通常の避難行動ができる者を対象として，人的被害の発生する危険性が明らかに高まった状況で発表される情報
		避難指示	対象地域の者全員を対象として，人的被害の発生する危険性が非常に高いと判断された状況，人的被害の発生した状況で発表される情報

を図 2.9 に示す．生成と提供は複数の組織によって行われる．生成と提供には，A. 災害情報の生成に関わる組織として気象庁，国土交通省等の防災組織，B. 生成された災害情報を加工して新たな災害情報を生成する組織として基礎的自治体（市町村），広域的自治体（都道府県），C. 災害情報を提供される側として報道機関や被災地域の人々が関わっている．

生成と提供は複数の防災組織で行われる．はじめに，気象観測のための雨量計のような気象センサやドップラーレーダ，偏波レーダ等の気象レーダ，河川を監視するための河川水位センサから降水量や河川の水位が観測され，防災組織はこれらの観測値を収集する．日本では主に気象庁，基礎的自治体（市町村）が気象に関する観測値を観測し（A-1），国土交通省，広域的自治体（都道府県），基礎的自治体が河川に関する観測値を観測する（A-2）．そして，観測値をもとに気象予測，河川の水位予測が生成される（B-1）．この過程で複数の防災組織が災害情報を共有し，状況に応じて警報や避難情報を生成する．観測値，予測値をもとに水害による被害の危険があると想定されるとき，警報や避難情報が生成される．最後に収集した観測値，生成した予測値，警報，避難情報の提供が行われる（B-2）．提供には各防災組織が，インターネットや防災行政無線を使用して対象地域の住民へ直接情報を提供する場合（C-1）と，各防災組織から報道機関へ情報を伝え，テレビ，ラジオを使って報道機関が対象地域の住民へ情報を提供する場合（C-2）の 2 種類がある．

2.3. 観測値の生成

2.3.1 観測値の重要性

観測値は降雨や河川，浸水の状況を把握するために不可欠である．豪雨と浸水では，観測値として主に降水量，河川水位，浸水深が活用される．降水量は，観測点の降雨の程度を示す値である．河川水位からは，堤防面と水面の差として氾濫までの高さを知ることができる．浸水深は，市街地の道路や建築物の周辺での，地面から水面までの高さを示す．豪雨は短時間に大きな気象変化をもたらし，浸水を発生させる．なかには 10 分程度の豪雨で河川の水位が 3m 近く上昇し，河川

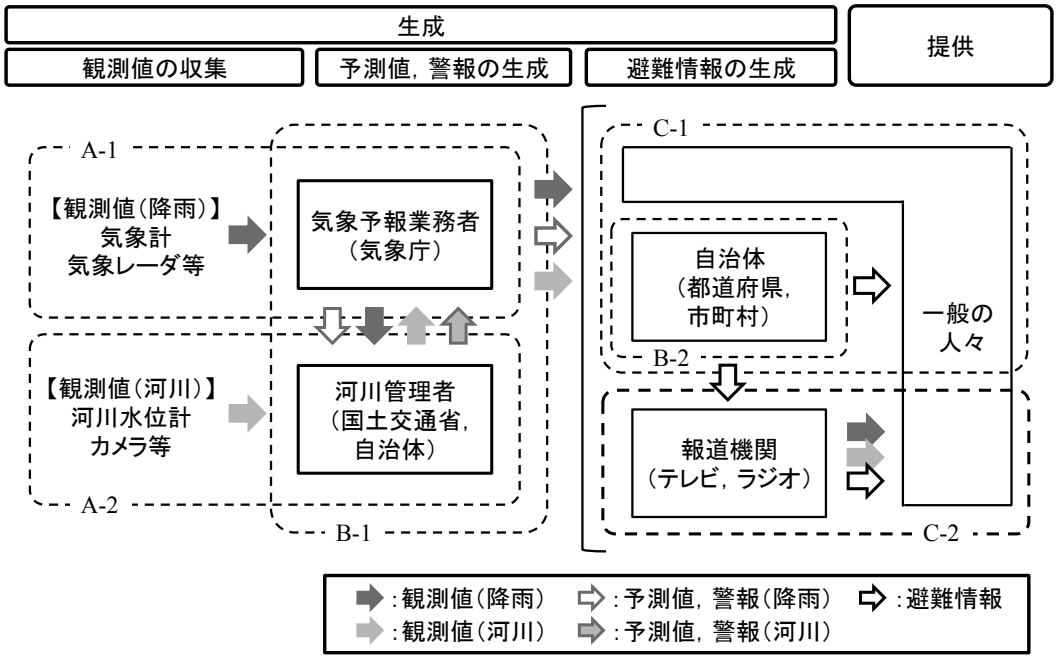


図 2.9 豪雨と浸水発生時における災害情報の生成と提供フロー（各市町村の地域防災計画をもとに作成）

の氾濫が発生した事例がある [39]．刻々と変化する降雨や河川，浸水の状況を把握するためには，正確な観測値を知ることが重要となる．

2.3.2 降雨や河川，浸水の観測

降雨や河川，浸水の観測網を図 2.10 に示す．降雨の観測網には，上空観測として気象衛星やドップラーレーダがある [45] [46] [47] [48]．実際に地上で起きている降雨は，気象センサネットワークの雨量計で観測できる [49] [50]．降雨によって起きる河川の水位変化や市街地への浸水を観測するために，水位計，浸水計が使用される [51] [52]．雨量計は国内約 8,800ヶ所，河川の水位計は 5,600ヶ所に配置されている [53]．さらに，河川の様子を画像で監視するための監視カメラも主要河川に配備され災害対応の立案に役立てられている．浸水の観測は仙台市，岡崎市，藤沢市等の一部の都市域で実施されている [54] [55] [56]．

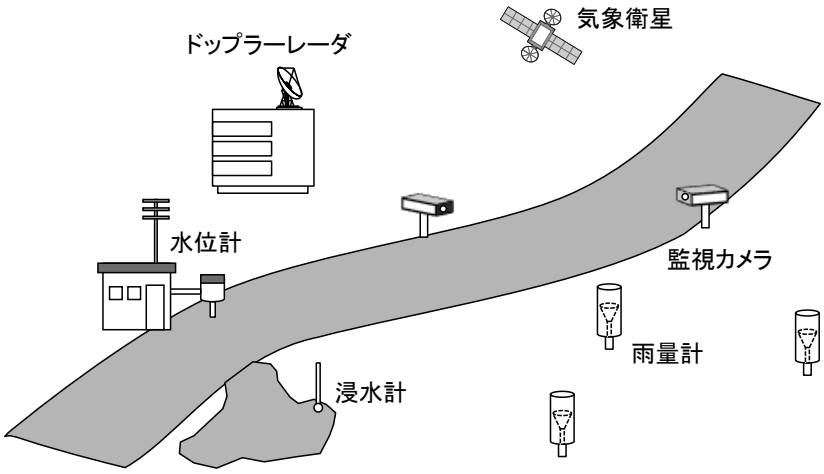


図 2.10 降雨，河川，浸水の観測網

2.3.3 降雨の観測網

代表的な雨量計として，転倒ます型雨量計や降雨強度計，感雨計がある [57] [58]. 転倒ます型雨量計は，内部の転倒ますに降水量 0.5mm に相当する雨水が貯まり，ますが転倒した数を計測することで降水量を測定する雨量計である．また，降水強度計は，降水粒子落下時の圧力や降水粒子の影をパルスとして検出し，降水量に変換する．感雨計は，降雨の有無を観測する雨量計であり，降水粒子を介して観測機器に電流が流れた際，降雨があると判定する．

気象レーダは，上空の積乱雲に電磁波を当て，雨粒からの反射波を計測して降雨の程度や風向，風速を観測するシステムである．従来，観測に活用されている気象レーダは C バンド帯の気象レーダであり，観測間隔が 5〜10 分，観測の空間分解能が 1km と大きい．そのため短時間に降雨状況が変化した場合，その変化を追うことは難しかった．こうした既存の気象レーダの欠点を克服する新たなレーダとして，X バンドマルチパラメータレーダやフェーズドアレイレーダがある [48] [59]. X バンドマルチパラメータレーダは，観測間隔が 1 分，空間分解能が 250m であり，従来の気象レーダと比べ局所的な降雨を正確に捉えることができる．また，雨粒の大きさを観測することができ，従来は難しかった降水量の予測推定が可能である．フェーズドアレイレーダは，観測に必要な走査距離が短いアンテナを利用し

ており，最小 10 秒程度の間隔で観測が可能なレーダである．これらのレーダは上空を 3 次元で観測することも可能であり，既存の気象レーダでは知ることのできなかった降雨を観測できると期待されている．

2.3.4 河川水位，浸水深の観測網

河川水位や浸水深を観測する水位計には，接触式の水位計と非接触式の水位計がある [60]．接触式の水位計として，目盛りが記された板を護岸や道路に設置し目視で水位を読みとる量水板や，観測井にフロートを浮かべ水位変化を観測するフロート式水位計，水圧を検出して電気信号に変換する水圧式水位計のような水位計がある．また，浸水の水面が電極に接触し電気が流れることを利用した電極式浸水計も，市街地の浸水観測に有効である [56]．非接触式の水位計には，超音波パルスを水面に送波し，水面からの反射波の伝搬時間を水位に換算する超音波式水位計が利用されている．

2.4. 既存研究の観測値と指標

2.4.1 豪雨に関する観測値

表 2.3 にインターネットを経由して，実際の被災地域の人々が入手できる観測値と指標をまとめ，その特徴について述べる．豪雨の状況を把握するための観測値には，天気予報，行政設置の観測網を利用した気象データ配信，民間設置の観測網を利用した気象データ配信がある [49] [52][61] [62] [63]．雨量計の降水量や気象レーダの降水強度を用いて，数時間前の降水予測や現況の降雨が提供される．観測値は，テレビ，ラジオだけでなく，インターネットを経由してメール，PC，スマートフォンで確認することができる．

雨量計の降水量と気象レーダの降水強度の提供例を図 2.11 に示す．雨量計の観測値は，観測点の降水量が数値や図で示される．気象レーダの観測値は，地図上に各格子の降水強度を表示し，提供されることが多い．降水量は，都道府県や市町村に各数個，もしくは主要駅やランドマークに設置された雨量計から取得され，

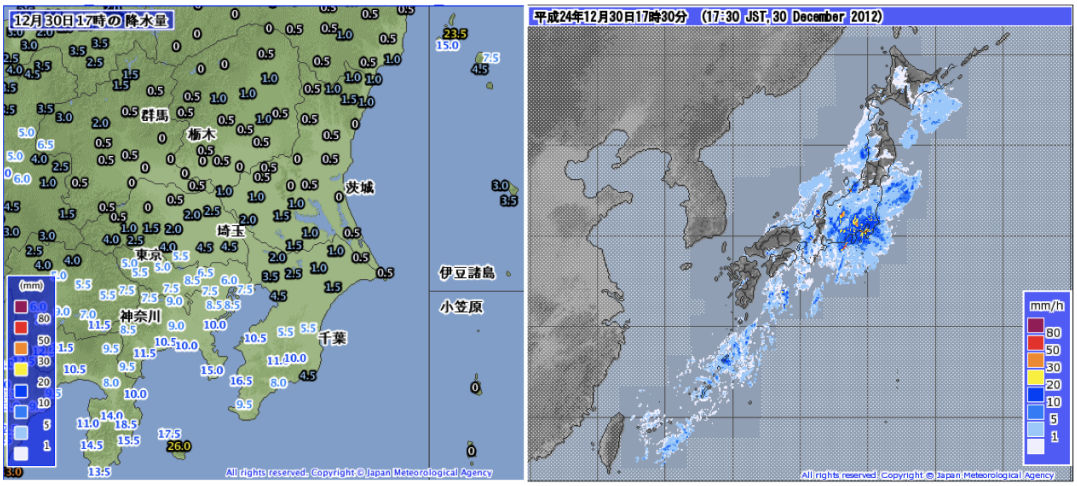


図 2.11　雨量計，気象レーダの観測値（[46] より）

周辺の地域へと提供される．雨量計による降水量の観測は，観測点が有限であるため，観測機器が未設置である観測の行われていない地域（空白域）が存在する．空白域では観測値が生成されないため，周囲への情報提供には，最も近い地点に設置されている雨量計の降水量が用いられる．

2.4.2　浸水に関する観測値

浸水の状況を把握するための観測値として，河川水位の観測値と市街地の浸水深の観測値について述べる．河川水位の観測値は，国土交通省や各自治体から一般の人々に向けて提供されている [51] [52]．河川水位の観測値として，河川の水位や堤防までの高さが 10 分おきに提供されている．浸水の観測値は，地面からの浸水深が 1〜10 分おきに提供されている [54] [55] [56]．これらの観測値は，インターネットを経由して提供されており，メールや PC，スマートフォンで確認することができる．

河川水位の提供例を図 2.12 に示す．観測値として，観測点での河川水位や浸水深が数値や図で示される．外水氾濫の観測には，大河川に数個設置された水位計が用いられる．東京都にある神田川は，源流の井の頭池から隅田川まで合流する両国橋付近までの東京の中心部を横断しており大河川にあたる．神田川の全長は約



図 2.12 河川水位の観測値 （[52] より）

25km ほどであるが，公表されている水位は 8ヶ所の観測点のみとなっている．また，中小河川や水路で発生する内水氾濫の観測は，ほとんど行われていない．そのため水位計の設置されていない地点で浸水を招く氾濫が発生する場合，観測を行うことができない．また，浸水の観測は一部の都市域で行われているものの，ほとんどの市町村では浸水計が設置されていない．観測値自体が存在しないと同時に，観測が行われている場合であっても，設置箇所で浸水が発生すると限らず，設置箇所から離れた地点で浸水が発生した場合，観測を行うことができない．

表 2.3: 豪雨と浸水に関する観測値と指標

項目			提供元	提供データ	受信方法	提供時間	更新間隔	範囲：生成地点
豪雨	観測値	天気予報	民間	降水量 降水強度	テレビ， ラジオ	1 週間〜 数時間前	数時間	各都道府県に数個
		気象データ 配信：行政設置 の観測網利用	気象庁		PC，スマートフォン	現況〜 1 時間前	5 分〜 1 時間	各都道府県に数個 各地方の概況
			自治体			現況	10 分	各市町村に数個 市町村の概況
			国土交通省	降水強度		現況	5 分	各地方の概況
			民間（気象機関： ウェザーニューズ， 気象協会等）	降水量 降水強度		現況〜 1 時間前	10 分	各都道府県に数個 各地方の概況
			民間（気象機関: 気象協会等）	降雨の有無 降水強度	メール	現況〜 1 時間前	降り始め 強雨検知時	各市町村に数個 主要駅周辺
		気象データ 配信：民間設置 の観測網利用	民間（気象機関： ウェザーニューズ， 気象協会等）	降水量	メール，PC， スマート フォン	現況	10 分	各市町村に数個 ランドマーク周辺
			民間（通信）	降水量			1 時間	ランドマーク周辺 （全国 2,600ヶ所）
				感雨			10 分	ランドマーク周辺 （全国 2,800ヶ所）
			民間（研究機関）	降水量			1〜10 分	各市町村に数個 ランドマーク周辺

[次頁に続く]

表 2.3: 豪雨と浸水に関する観測値と指標（続き）

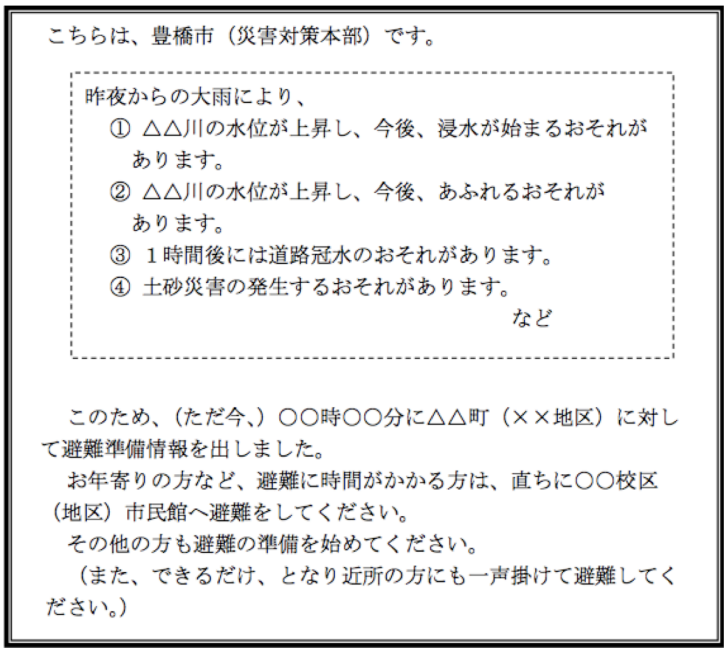
項目			提供元	提供データ	受信方法	提供時間	更新間隔	範囲：生成地点
豪雨	指標		気象庁	解析雨量	PC，スマートフォン	45 分後	30 分	各地方の概況
			民間（気象機関：ウェザーニューズ，気象協会等）	雨の指数	メール，PC，スマートフォン	数時間前	数時間前〜1 日	各都道府県に数個
			民間（気象機関：ウェザーニューズ）	雨雲の有無		現況	雨雲接近時	各市町村に数個
				天気，強雨検知と危険の有無		数時間前〜現況	強雨検知時	検知地点周辺
浸水	観測値	河川水位データ配信：行政設置の観測網利用	国土交通省，自治体	河川水位，ライブカメラ画像	メール，PC，スマートフォン	現況	10 分	各河川に数個
		浸水データ配信	自治体，民間（研究機関）	浸水の発生有無		1 時間前〜現況	浸水発生時発生後は 5 分〜1 時間	浸水の危険箇所
	指標		国土交通省，気象庁	流域雨量指数	PC，スマートフォン	6 時間前〜現況	1 時間	流域 5km 格子
			自治体，民間（研究機関）	推定浸水深	PC，スマートフォン，ハザードマップ	-	なし	数十 m 格子

2.4.3 豪雨の指標

豪雨の影響を知るために使われる代表的な既存技術や既存研究を挙げる．空白域の降水量を求めるための手法として，レーダ・アメダスを活用した解析雨量による推定がある [64] [65]．推定した降水量分布は，その値に応じていくつかの色や段階に分類，提示される．気象庁での降水量の観測点は 2013 年現在，平均 17km おきとなっており，この観測値や他の気象センサ，気象レーダの観測値をもとにして 30 分間隔で解析雨量が生成されている．気象レーダは，広い範囲の上空にある積乱雲を観測する．そのため，観測点と観測された降雨が地上に降り注ぐ地点にずれが生じる．これは上空に生じる風の影響によって起こると考えられ，気象レーダの観測値と地上での降水量が異なることも少なくない．特に少しの距離の差で気象変化が大きく異なる都市域においてはこの差が大きくなると考えられる [33]．そのため，場所によって解析雨量と実際の豪雨の影響には差が生じる．

観測値や解析雨量をもとに自治体等の防災組織が，警報・注意報として被災予測情報や避難情報を提供する．避難情報の例を図 2.13 に示す．被災予測情報や避難情報は豪雨の危険を示唆するだけでなく,「どのような行動をとったらよいか」,「どのような行動をとってはいけないか」の解説がされることもある．被災予測情報，避難情報は生成されインターネットやテレビ，ラジオ，防災行政無線を使用して提供される．

ほかの豪雨に関する指標として，民間の気象機関が提供する降雨の指数がある [66]．傘指数は降雨によって傘の必要性があるかを数段階の数値として示す．観測値ではなく，実生活にどのように影響するかを示すことで，降雨の影響を把握するために有効となる．他の指標には，民間の気象機関が強雨の検知結果，危険の有無を情報提供するサービスがある [67]．サービスの利用者同士が地上で発生している降雨を「雨が降ってきた」,「激しい雨が降っている」といった表現で記録し共有する．利用者の記録に基づいて降雨状況が数段階の数値で提供される．この指標は，利用者からの記録をもとに生成するため，これまでの観測値，指標とは異なり観測点の制限がない．利用者と同等数の地点での降雨状況を収集，共有することができる．そのため，降雨状況を記録する利用者が多い場合，観測点数が増え範囲の広さが問題とならない．既存の指標は詳細な時間幅での更新を目的と


こちらは、豊橋市（災害対策本部）です。

昨夜からの大雨により、
① △△川の水位が上昇し、今後、浸水が始まるおそれがあります。
② △△川の水位が上昇し、今後、あふれるおそれがあります。
③ １時間後には道路冠水のおそれがあります。
④ 土砂災害の発生するおそれがあります。
など

このため、（ただ今、）○○時○○分に△△町（××地区）に対して避難準備情報を出しました。
お年寄りの方など、避難に時間がかかる方は、直ちに○○校区（地区）市民館へ避難をしてください。
その他の方も避難の準備を始めてください。
（また、できるだけ、となり近所の方にも一声掛けて避難してください。）

図 2.13 警報，避難情報の提供例（[68] より）

して作られておらず，指標を生成するために長時間を必要とするため，その更新間隔は大きいことがある．また，既存の指標の提供範囲として，観測値を利用して生成する指標では広範囲に対して一律の指標が活用される．ただし，観測点周辺の詳細情報をもとにした場合，詳細な範囲に応じた指標の生成が可能となる．

2.4.4 浸水の指標

浸水の指標のうち，河川の氾濫に関わる指標として，流域雨量指数が挙げられる [69]．流域雨量指数は，降雨が下流に与える影響を推定した数値を指数として提示する．浸水の程度を示す手法として，外水の氾濫水の流れを解析する解析モデルや，市街地に流出する氾濫水の流れを解析する解析モデル，越水する水流の時系列変化を解析する数値解析等による浸水想定がある [70] [71] [72] [73] [74]．浸水想定は，降水の流れや流出量の解析，過去の浸水実績から浸水の発生や浸水深を推定するモデルである．推定結果は，浸水深の数値や，その値に応じたいくつかの色，段階に分類，提示される．また，各市町村からハザードマップとして提供され

る [75] [76] [77]．この指標は，市街地を特定長の格子に分割し，その格子ごとに浸水深を算出する．観測値をもとに生成される指標は，広い範囲に同じ指標が活用されるが，浸水深の算出では．詳細な範囲を対象とした指標化も可能となる．しかし，これらの指標は生成のための時間がかかり，更新時間も長くなる．また，過去の浸水実績をもとに作成されるため，現況にあわせた提供ではなく，更新も行われない．そのため必ずしも想定していた降雨状況になるとは限らず，実際に発生する浸水はハザードマップで示された値や段階と異なることが多い．また，観測値や流域雨量指数をもとに自治体等の防災組織が，警報・注意報として被災予測情報や避難情報を提供する．

2.4.5 既存の観測値と指標のまとめ

既存で提供されている観測値や指標は，広範囲に一律な情報が活用されている．そのため，提供される観測値と実際の豪雨と浸水の発生地点が異なる．また指標は，詳細な時間幅での生成を対象としていないため，その更新間隔と，豪雨と浸水発生の時系列変化とが異なる．その結果，指標の提供時間と，豪雨と浸水の発生タイミングに時間的なずれ降水量や河川水位，浸水深と，豪雨と浸水の発生箇所に空間的なずれが生じ，豪雨と浸水の程度やその影響である被災状況の把握が困難となる．本研究では，時間と範囲に着目し，既存の観測値や指標の特徴が情報提供に与える影響を検討する．

2.5. 本研究で取り組む指標に関する課題

2.5.1 指標の提供時間と実際の発生タイミングのずれ

観測値の提供時間/更新間隔

気象庁や自治体から提供される降水量の観測値は，1〜10 分単位で観測され，特定の時間幅での合計値が降水量として提供される．行政や民間からの情報提供で主に活用されている 1 時間降水量は，1 時間の間に地面に溜まった雨の深さの合計を示す単位である．しかし，実際の降雨状況は 1 時間のうちに細かく変化するた

め，平均化された降水量である 1 時間降水量と最大降水量には差が生じる．つまり，降水量の観測値は，観測や提供の時間間隔によって左右され，実際の降雨を示した値とならない場合がある．

河川水位の観測値は，1 分単位での観測と，10 分単位，1 時間単位での提供が行われている．しかし，降雨と河川水位の上昇の関係はわかっておらず，特に上流からの流入量が多い場合，短時間で急激な上昇が起きる．既存の観測値の観測や提供間隔では，この急激な河川水位の時間変化を捉えていると限らない．そのため，既存の降水量や河川水位の観測値が示す値は，実際に起きている現象とのずれが生じる可能性がある．

指標の提供時間/更新間隔

指標は，降水量や河川水位の観測の空白域に対し推定される値である．指標の生成には，算出のもととなる観測値の収集や推定，提供を行う時間が必要となる．既存の指標のうち解析雨量は 30 分ごとに生成される．そのため，提供される値には，観測値の収集から推定までの間に起きる気象変化が反映されない．つまり，即時性に欠ける推定によって指標と実際に起きている豪雨にずれが生じる可能性がある．また，実際の河川水位や，浸水が起きた際の浸水深と，指標として推定された値には大きなずれがある．特に，過去の被災状況から一定の降水量があったと仮定し，指標を生成する浸水推定では，被災状況に応じた更新が考慮されない．生成には実際の降水や氾濫の変化を考慮していないため，実際に起きている浸水と推定された値には大きなずれが生じる．

2.5.2 観測値，指標の提供範囲と，豪雨と浸水の発生箇所のずれ

発生箇所にずれが生じる理由に観測値の空間分解能が挙げられる．気象庁や自治体では，降水量はひとつの都道府県に対し，数ヶ所の雨量計で観測されている．東京都に，気象庁が設置している観測点は 4ヶ所であり，平均 17km おきに観測点が存在する．さらに，自治体や研究機関の設置している観測点を加えると，多いところで 2.4km 程度の密度で観測が行われている．しかし，降雨は小さな距離の

違いが降水量に影響することが知られている．そのため，観測点で観測される降水量と観測点から 1〜2km 離れた地点の実際の降水量が大きく異なることも多い．特に，短時間強雨は 2km 程度の小さな積乱雲によって狭い範囲に生じる豪雨である．短時間強雨を観測するためには，2km おきの密度で観測点が必要となる．既存の密度の小さい観測網では短時間強雨を検出できないことも多く，観測点では観測されない強い降雨が，観測点以外の対象地域で発生する．

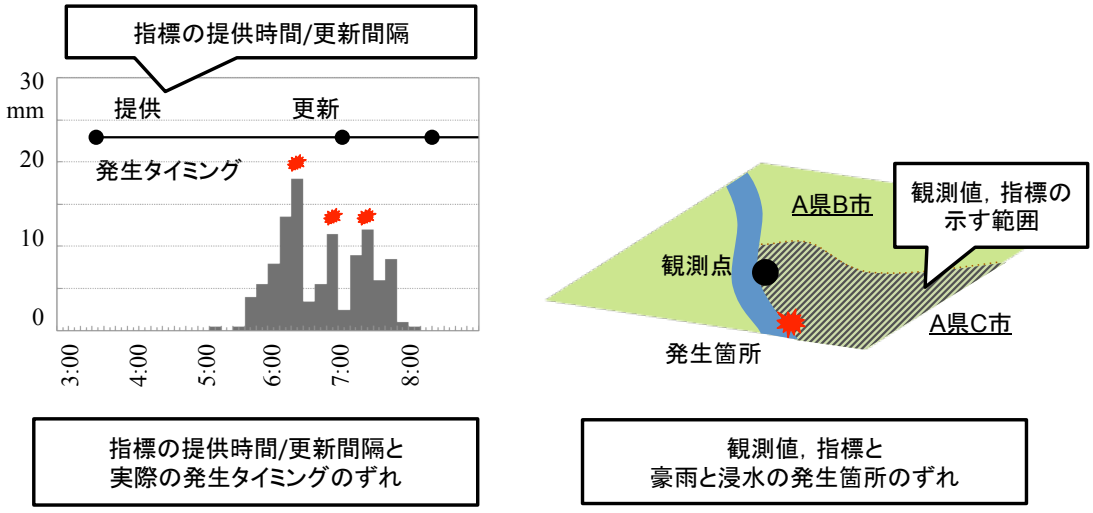
また気象レーダは，250〜1,000m の空間分解能で観測が行われているため，狭い範囲で生じる降雨が観測できる．しかし，気象レーダは，上空に存在する雨粒を観測するため，その観測値は，実際の地上で発生する降雨と位置のずれが生じる．特に土地利用の複雑な都市域では，そのずれが大きくなる．高層ビル群から生じる強い風によって，雨粒の位置が，上空と地上で 1〜2km 以上変わると言われている．

さらに，外水氾濫が発生する河川の水位観測点は，1 つの河川につき数ヶ所程度となっている．また，内水氾濫が発生要因となる中小河川や水路での水位観測は，行われていないことも多い．観測は氾濫の発生が起こりやすい地点で行われるが，観測点以外で氾濫が発生することもあり十分な地点数とはなっていない．河川付近だけでなく河川から離れた地点で浸水となった場合，観測値から浸水の状況を知ることができない．

降雨状況の変化は，数十 m 単位で生じることがあり，距離の差によって豪雨から受ける影響は大きく異なる．浸水は，豪雨に影響を受けるため，同様に距離によって，浸水深に差が生じる．しかし，実際には観測機器の設置場所の確保や環境の整備の困難さから，数十 m の詳細な間隔で，観測点を設けることは難しい．観測点の不足している観測値を提供した場合，広範囲に一律の情報を提供することとなる．しかし，降雨や河川水位，浸水深の変化は地点ごとに大きく異なり，情報が示す内容に差が出る．

2.5.3 時間的，空間的ずれによる影響

豪雨と浸水の危険を回避するためには，観測値や指標からの被災状況の把握が有効となる．図 2.14 に既存の観測値，指標の提供時間/更新間隔と空間分解能を



(a) 時間のずれ　　(b) 空間のずれ

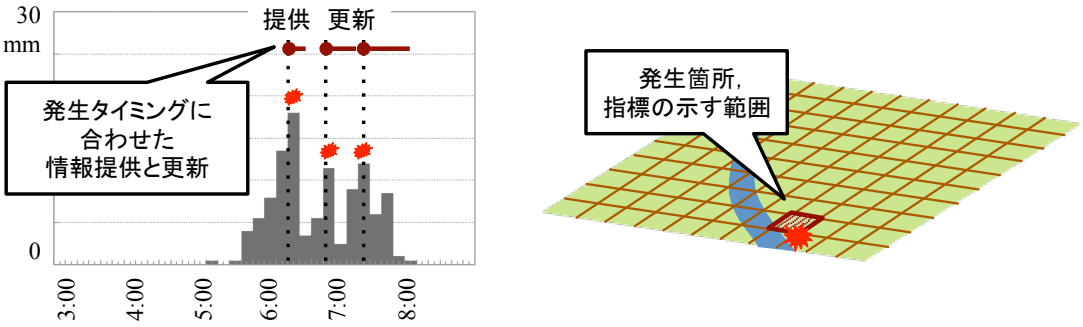
図 2.14　既存の観測値，指標の課題

示す．指標の提供時間/更新時間と実際の豪雨と浸水の発生タイミングにはずれが生じる．時間のずれは，即時性の欠如を招く．被災地域の人々が入手する観測値，指標が過去の豪雨と浸水の状況を示している場合，実際の被災状況はより進行している可能性がある．次に，観測値の示す地点，指標の示す範囲，豪雨と浸水の発生箇所は異なっている．空間的なずれは，観測値や指標の持つ妥当性の欠如に繋がる．被災地域の人々が入手する観測値，指標は，実際の豪雨と浸水の影響と関連がない可能性がある．そのため，観測値，指標をもとに被災状況を把握することが困難となる．

2.6. 本研究で目指す指標の生成

本研究では，既存の観測値や指標と，実際の豪雨と浸水の発生タイミング，発生箇所に生じるずれの解決を目指す．目的とする指標を，図 2.15 に示す．指標は，豪雨と浸水の発生に合わせて生成し，時系列変化に応じた影響を示す．また，豪雨と浸水が発生する箇所を指標として示す．生成した指標を，インターネットを通じて，防災組織や被災地域の人々へ提供することを目的とする．

豪雨と浸水の影響の時空間分布を指標として生成することで，被災状況の把握



(a) 指標の時間分布　　(b) 指標の空間分布

図 2.15　本研究で目指す指標の生成

が可能となり被害の軽減，防止に繋がると期待できる．時間的，空間的なずれは，既存の観測値や指標の提供時間/更新間隔や空間分解能が大きさに影響を受ける．発生タイミングのずれを解決するため，即時性の高い指標を生成する．また，被災する地域を格子状に分割し，各格子の時系列変化を指標として生成する．豪雨と浸水の発生する格子が発生箇所となる．次章から，既存の観測値を活用して発生する豪雨と浸水の影響を推定し，指標として生成するための指標化モデルについて述べる．

第3章
豪雨と浸水の時空間分布を推定する指標と指標化モデルによる生成

3.1. 指標化モデル

3.1.1 指標化の目的

豪雨と浸水の被害を軽減にするためには，その程度や影響を被災地域の人々へ知らせ，危険回避行動を促すことが必要となる．これまでのリスクコミュニケーション研究は，情報提供機関（気象機関，河川管理機関，自治体）から被災地域の人々へ向けて災害情報を迅速に提供するためのシステム，災害情報の提示手法，正しい判断や指示による危険回避行動に焦点が置かれてきた [2] [9] [78]．しかし，豪雨と浸水から人間が受ける影響を自律的かつ的確に把握するためには，豪雨と浸水の時空間分布を推定するための「豪雨・浸水の指標化」が非常に重要である．そのため本研究では，被災状況の把握に役立てるために豪雨と浸水の指標化モデルの提案を行う．

図 3.1 に既存の災害情報提供を示す．従来の災害情報提供では，降雨や河川水位の観測値は生成後，そのままの形で人々に対して提供されていた．本研究では，従来の災害情報提供に新しく「指標化」の概念を導入する．豪雨と浸水の指標を生成し，インターネットを通じて防災組織や一般の人々に対して提供する．指標は豪雨の状況，浸水の状況として，豪雨と浸水の時空間分布を表す．被災する地域にいる人々にとって降水量や河川水位，浸水深の観測値は直接，豪雨と浸水の程度やその影響を表す情報ではない．実際の影響は，浸水する可能性や浸水の程度，浸水による被害である．そのために浸水の可能性を示す情報として豪雨の状

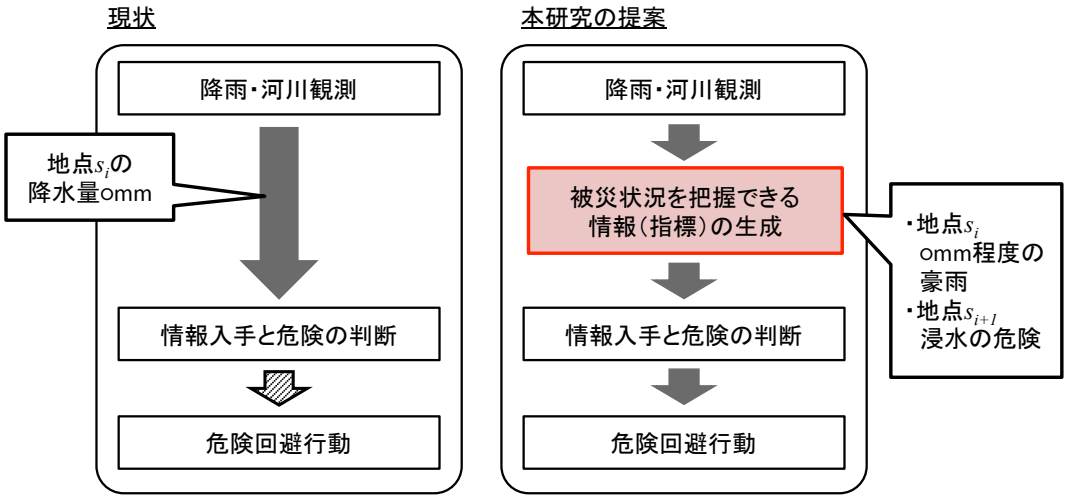


図 3.1 指標による被害の軽減

況，浸水の程度を表す情報として浸水の状況を指標とする．本研究の指標化モデルは，対象の地点に対して即時性の高い指標を生成，提供するためのモデルとなる．2 つの指標は，複数の観測網から得られる観測値を組み合わせ，リアルタイムで生成する．

3.1.2 指標化モデルによる指標生成の流れ

指標化モデルによる指標生成の流れを図 3.2 に示す．はじめに，観測点以外の地点における降雨や河川，浸水の状況を推定値として算出する．ここで算出される値は，降水量と河川水位となる．次に算出した推定値と環境要因を組み合わせて，ある地点での時空間分布を推定し指標を生成する．環境要因は，土地の高度や危険箇所からの距離のように，豪雨と浸水からの影響の受けやすさを示す．生成した指標は，防災組織や一般の人々に対して提供する．豪雨と浸水の被害の大きさは，環境要因のほかに，インフラの強さや年齢や身体機能のような人の属性に影響を受ける．生成した指標と，他の要因を組み合わせることで，特化した災害情報の生成と提供が可能になると考える．

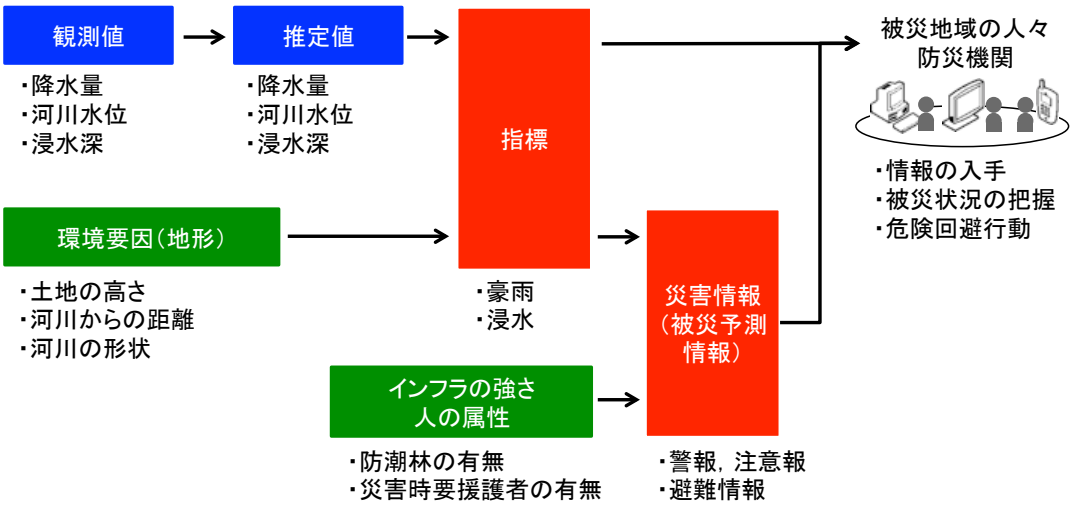


図 3.2 指標化モデルによる指標生成の流れ

3.2. 指標化モデルの構成

はじめに，研究対象領域を D とする．

$$s = [lon, lan] \in D \tag{3.1}$$

のように，s を領域 D における二次元上の任意の位置座標（経緯度）とし，対象の時刻 t における指標を算出する．D と降水量，降水強度，河川水位，浸水深の観測点との関係を図 3.3 に示す．

対象地点の座標を

$$s_i \in D \tag{3.2}$$

とし，簡単のため i と表記する．また，$i = 1, \cdots, n$ となる．このうち，雨量計の降水量，気象レーダの降水強度，河川水位，浸水深の観測点をそれぞれ，s_k，s_j，s_l，$s_{l'}$ とし，それぞれ k, j, l, l' と略記する．$i = k$ のとき，雨量計の観測点での指標を指す．また，$k = j$ のとき，雨量計の観測点と気象レーダの観測点が一致する．

指標化モデルの構成を図 3.4 に示す．観測値を線形近似して空白域の推定値を算出する．観測値，推定値，環境要因から豪雨と浸水の要因となるインディケータ $I_m(t)$ を算出し，インディケータの組み合わせによってインディケータ関数 $I(t)$

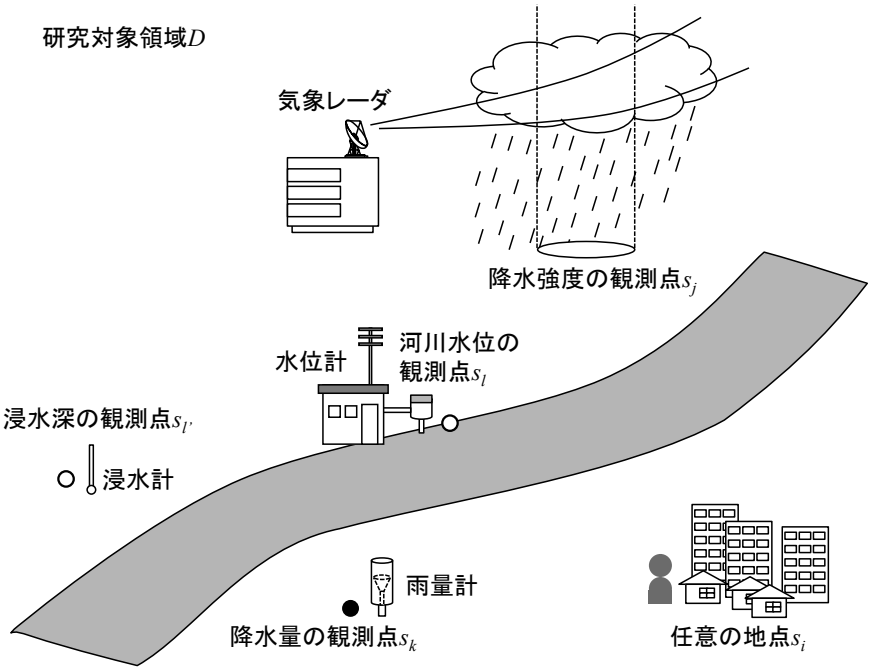


図 3.3 研究対象領域と観測点

を構成する．$I(t)$ を算出するための，$I_m(t)[\cdot]$ は，条件（$\cdot$）を満たすとき，0，1，2，3 の 4 つの値をとるインディケータである．$I_m(t)$ と閾値を比較することで $I(t)$ を決定し，豪雨と浸水の影響として指標 $P_i(t)$ を生成する．以下，豪雨と浸水の影響について，インディケータ $I_m(t)[\cdot]$ を用いて指標の算出を行う．

3.3. 豪雨とその指標

本研究では，豪雨へ発展する可能性があり，人の行動へ影響を与える激しい降雨を指標化する．指標の生成は，豪雨の影響として現況，周囲の状況（危険の接近，継続）の観点から行う．豪雨に関する指標を表 3.1 に示す．指標は，表 2.1，表 A.1（付録 A）をもとに豪雨が人に与える影響を整理し，指標としてまとめた．本研究では，豪雨の程度と人へ与える影響を分類し，定性的な指標とする．屋内で降雨にあった場合，小さい降水量が人に与える影響はほとんどない．降雨が激しくなるにつれて，外出を控える等，行動が影響される．屋外での豪雨の指標に

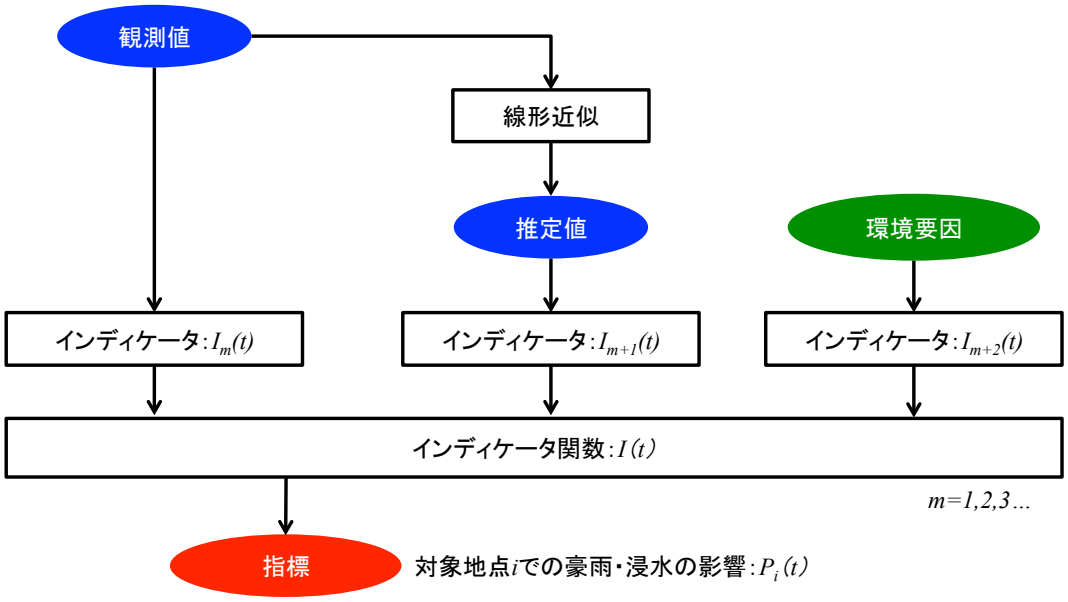


図 3.4 提案する指標化モデルの構成

は，さらに日常生活への影響が懸念される．屋外にいる場合，降水量が小さいと人の行動はほとんど影響されないが，降水量が大きくなるにつれ，傘をさす，自転車の運転を控える，自動車の運転がしづらくなる等の支障が出てくる．大きな降水量では，激しい降雨により外出ができなくなり，電車のような公共交通機関の乱れが起きる．さらに屋内，屋外ともに激しい降雨になると，浸水が発生し，危険回避行動をとる必要が出る．行動の制限や危険回避行動を伴う降雨を，豪雨として指標化する．

3.4. 豪雨に関する指標の妥当性と即時性

3.4.1 豪雨に関する指標の妥当性

豪雨に関する指標は複数の観測網から得られる観測値をもとに生成する．図 3.5 に示すように，上空観測網には，気象レーダであるドップラーレーダを活用する．また，地上観測網として気象センサネットワークを活用する．対象地点が空白域

表 3.1 豪雨に関する指標

降雨	屋内	屋外	影響の例（屋内/屋外）
大	危険回避行動	危険回避行動	浸水の発生
↑	行動の制限	行動の制限	外出不可/視界不良, 公共交通機関の乱れ
小	-	日常生活への影響	屋外活動の制限
	影響なし	影響なし	影響なし

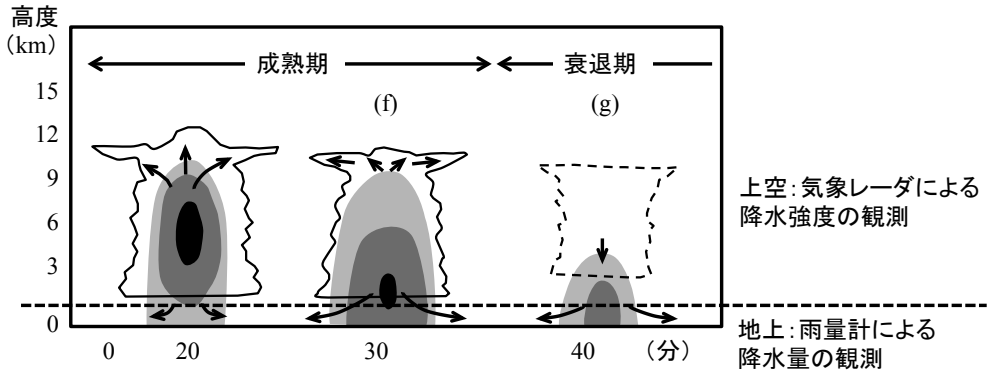


図 3.5 上空観測網と地上観測網

に存在するとき，気象レーダの観測値と雨量計の降水量を組み合わせて，降水量を推定し，豪雨の指標を生成する．

複数の観測網を統合して利用することで，観測点以外の空白域に存在する地点での豪雨の影響を推定することが可能になる．気象センサネットワークの雨量計は実際の降水量を観測することができ，他の観測網と比較して正確な観測値が得られるが，空白域の観測値を得ることができない．また，気象レーダは上空の積乱雲を観測しているため，実際の地上の観測値と異なる場合が多く，これらの観測値から被災状況を理解することが難しい．そのため地上観測網の観測値を，上空観測網の観測値を用いて補完することで雨量計が設置されていない空白域の降水量を推定する．気象センサネットワークを活用して周囲の被災状況を推定する技術は，本研究が初めての実施となる．

表 3.2 指標の生成タイミング

生成するタイミング	情報内容
降雨の降り始め	降雨の開始
降雨が閾値に達するとき	降水量
降雨の降り終わり	降雨の終了，降雨継続の可能性

3.4.2 豪雨に関する指標の即時性

豪雨に関する指標の生成タイミングを決め，決定した生成タイミングに合わせて指標を算出する．ここで線形近似した推定式を用いることで，計算時間を大幅に短縮し，即時性の高い指標の生成を行う．指標の生成タイミングを表 3.2 に示す．はじめに豪雨によって，いつ危険になるか，いつ危険がなくなるか，危険が発生する可能性のあるタイミングで指標を生成する．そのため降雨の始まる時間，降雨が終了し危険がなくなった時間で提示を行う．次に降雨が激しくなり，行動の制限や危険回避行動の必要性がある降水量に達する時間に，その際の降水量の提示を行う．

3.5. 豪雨に関する指標の生成手法

3.5.1 豪雨に関する指標生成の流れ

指標化モデルによる指標の生成手法を図 3.6 に示す．指標の生成のために必要となる空白域での降水量の推定値の算出，インディケータ $I_m(t)$ の生成，インディケータ関数 $I(t)$ への変換について順に述べる．はじめに雨量計，気象レーダから得られる観測値を収集，蓄積する．次に，観測値から空白域の降水量を推定値として地点ごとに算出する．収集した観測値，生成した推定値を対象地点の降雨状況を示すインディケータ $I_m(t)$ を生成する．複数の $I_m(t)$ を組み合わせて，インディケータ関数 $I(t)$ へと変換し，$I(t)$ があらかじめ設定した条件に達したとき，豪雨が発生したとして指標を生成する．

3.5.2 豪雨を決定する要因とその閾値

豪雨を決定する要因

豪雨を決定する要因について，豪雨の現況，周囲の状況（危険の接近，継続）の観点から検討する．現況の豪雨となる要因は，対象地点 i での降雨状況として，降水量で示すことができる．危険の接近を決定づける要因として，周囲で強い降水量が観測されたとき，i でも強い降雨がある可能性がある．また，i の上空に強雨域が存在するとき，対象地点は激しい降雨となる．危険の継続について，i で降雨がみられない場合であっても，周辺に強雨域が存在すると激しい降雨にあう可能性がある．以上のことから，豪雨の要因を観測値から生成するために，I_1：対象地点の降水量，I_2：近傍の降水量，I_3：上空の強雨域，I_4：周辺の強雨域の 4 つをインディケータとする．時刻 t において各インディケータを算出するための手法を述べる．

観測値の収集

はじめに雨量計の観測値として降水量，気象レーダの降水強度の観測値を収集する．各機関から提供される観測値は情報形式や表現形式が機関ごとに異なる．そのため，汎用性の高い IEEE1888 通信プロトコルを使用し，各機関から様々な方式で提供される観測値を同じように扱えるようにしたうえで，インターネットを通じて収集する [79]．降水量は観測機器によって観測量の単位が異なる．そのため，収集した観測値は，指標化モデルで変換し，情報形式や表現形式を統一している．観測点 k における時刻 t の降水量の観測値を，$r_{g,k}(t)$ とする．また，地点 j での降水強度を，$r_{r,j}(t)$ とする．

豪雨の閾値

豪雨となる降雨の程度を，本研究では閾値と呼ぶ．降水量として，従来提供されている 1 時間降水量，24 時間降水量では，短時間強雨のように 1 時間未満の短い時間に降水が集中した場合，降水量は平均化されてしまい，実際の降水量の最大値が不明瞭になる．そのため，本研究では降水量の閾値を算出するために，降

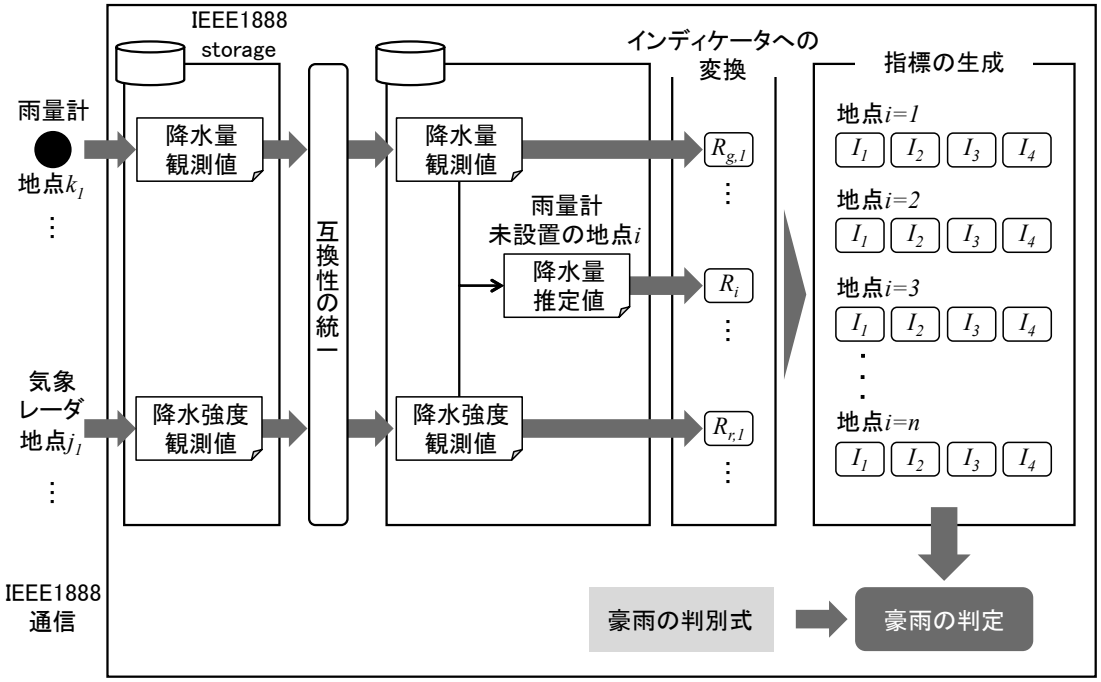


図 3.6 豪雨に関する指標生成の流れ

水量の数値積分を用いることとした．降雨は 1 分，10 分おき等，ある時間おきに観測される離散値として示される．この離散値について，時間間隔 $\delta\tau$ で数値積分した値を降水量として使用する．短時間強雨の発生のように，降水の形態は地球環境によって変化する．将来，降雨の形態が変化しても，降雨状況に見合った時間間隔 $\delta\tau$ で数値積分した降水量を用いることで降水量を正確に数値化することが可能となる．本研究では，豪雨の閾値として降水量 a_τ を用いる．

3.5.3 指標の生成

降水量の算出

観測点 k における時刻 t の降水量 $R_{g,k}(t)$ を算出する．ここで $\delta\tau$ は観測間隔であり，τ は求めたい降水量の時間幅となる．このとき，時刻 $t-\tau$ から t の間の降水

量を以下の式で示す．

$$R_{g,k}(t) = \int_{t}^{t-\tau} r_k(t)dt = \sum_{k=t-\tau}^{t} r_k(t) \times \frac{\tau}{\delta\tau} \tag{3.3}$$

式 3.3 を用いて 1 時間降水量を記述する．観測間隔 $\delta\tau = 1$（分）の観測値を用いて 1 時間降水量を算出する場合，$\tau = 60$（分）であり，時刻 t における降水量は

$$R_{g,k}(t) = \int_{t}^{t-60} r_k(t)dt = \sum_{i=t-60}^{t} r_k(t) \times 60 \tag{3.4}$$

となる．

推定値の算出

短時間で精度の高い降水量の推定値を算出するため，推定値の生成には複数の機関が設置している雨量計を統合して使用する．対象地点の近傍に存在する観測点の降水量は，その周囲の降雨の傾向を代表する可能性が高い [80]．そのため，高密度な気象センサネットワークを用いて，対象地点の近傍の雨量計の観測値から推定値を算出することとした．生成した推定値は観測値とともに表 3.2 に示す指標の降水量として使用する．

空白域における降水量の推定値は，従来の解析雨量と同様に雨量係数を求めることで算出する [64] [65]．雨量係数は，気象レーダから得られる降水強度と雨量計から得られる降水量の比率を指す．従来の解析雨量は全国約 10,300 地点の雨量計のすべての観測値を使用して雨量係数を算出しているため，実時間での降水量の推定が困難であった．本研究では，対象地点の近傍の雨量計からの観測値のみを用いて，以下の式 3.5，式 3.6 を用いた線形近似で対象地点の降水量を推定することで，ほぼ実時間での推定が可能となった．雨量計の観測点 k での降水量 $R_{g,k}(t)$，空白域の対象地点 i での降水強度 $r_{r,j}(t)$ を用いて，降水量の推定値 $R_{g,i}(t)$ を求める．はじめに，雨量計による観測と気象レーダによる観測が実施されている地点 $k = j$ において，雨量係数 μ は以下の式で表される．

$$\mu = \frac{R_{g,k=j}}{r_{r,j}} \tag{3.5}$$

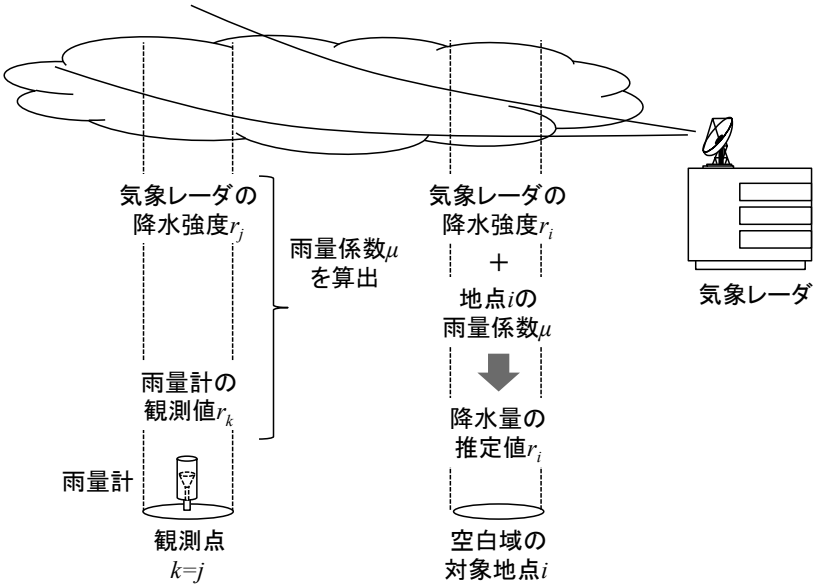


図 3.7 推定値の生成

対象地点 i の上空が j' であるとき，雨量係数から降水量の推定値を求める式は，

$$R_{g,i=j'} = r_{r,j'} \times \mu \tag{3.6}$$

となる．

統合した雨量計の観測値を利用して，図 3.7 に示す手順で推定値を算出する．

- 空白域の対象地点 i から最近傍にある観測点 k を選択
- 式 3.5 を用いて観測点 k の観測値から雨量係数を算出
- 式 3.6 を用いて対象地点 i における降水量の推定値を算出

豪雨の判別条件

対象地点 $s_i \in D$ における豪雨を判別する条件式を構築する．雨量計の降水量や，式 3.6 でレーダの降水強度から推定した降水量を R とし，豪雨の判別条件を定数

a_τ を用いて以下に示す．なお，$a_{1,\tau}$，$a_{2,\tau}$，$a_{3,\tau}$ は，定数 a_τ より小さい任意の値をとる．

$$I_m[R] = \begin{cases} 0 & (R(t) = a_{1,\tau}) \\ 1 & (R(t) = a_{1,\tau} < R(t) \leqq a_{2,\tau}) \\ 2 & (a_{2,\tau} < R(t) \leqq a_{3,\tau}) \\ 3 & (a_{3,\tau} < R(t)) \end{cases} \tag{3.7}$$

I_1：対象地点の降水量

豪雨の要因となる 4 つのインディケータを観測値から生成する．はじめに対象地点 i の降水量が $R_{g,i}$ であるときの，インディケータ $I_1[R_{g,i}]$ を求める．式 3.7 を用いて，降水量 $R_{g,i}(t)$ の値によって，$I_1[R_{g,i}(t)]$ は，0，1，2，3 のうちの任意の値をとる．

I_2：近傍の降水量

高密度な気象センサネットワークでは，近傍にある雨量計の示す降水量が増加傾向にあるとき，対象地点でも降水量が増加する可能性がある [80].．また，近傍で豪雨が起きているとき，対象地点も豪雨となる可能性があり，危険の接近が考えられる．そのため，図 3.8 に示すように，観測点 k の近傍の雨量計から得られる観測値を活用し，降水量の変化を求め，対象地点への危険の接近有無をインディケータ I_2 とする．

I_2 は，対象地点 i の近傍に存在する観測点 k の降水量から算出する．近傍の観測点の集合を，D_k と表す．ここでは，近傍を観測点 k から直径 ϕkm 以内にある観測点と定義する．例えば，近傍の観測点を $k = (1, 2, 3)'$，$\phi = 4$ とし，k と i の距離 $d_{k,i}$ をそれぞれ $d_{k,i} = (3, 1, 2)'$ としたとき，2，$3 \in D_k(2)$，$1 \notin D_k(2)$ となる．ここで，$I_2[\bullet]$ について $I_2[i \in D_k, i = 1, \cdots, n]$ を考えれば，近傍の降水量が構成できる．簡単のため $I_2[i \in D_k, i = 1, \cdots, n]$ を $I_2[i \in D_k]$ と書く．先の例であれば，$I_2[i \in D_k(2)] = (0, 1, 1)'$ となる．

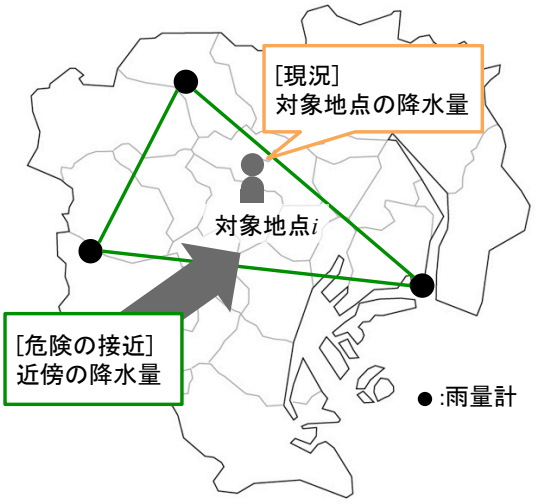


図 3.8 雨量計から算出する対象地点，近傍の降水量と現況，危険の接近

次に近傍の観測点は観測点 k に及ぼす影響を算出する．観測点 k からの距離が近いほど，同様の降雨状況となり，及ぼす影響が大きいものとした．ここでは，近傍集合内の i について，観測点 k から近い i における降水量に強い重みを与える．観測点 k からの距離に応じて重み付けし，それぞれの観測点で逆距離加重法を用いて基準化した．

重み付けは，

$$\left(\frac{1}{d_{i,k}}\right)^{\alpha} \tag{3.8}$$

を用いて行う．α は，$\alpha = 0.5, 1, 2, \cdots$ 等の適当な候補を設定し，観測点からの距離によって配分する．ここで $\alpha = 1$ とすれば，先の例では $I_2[i \in D_k(2)] = (0, 1, 1/2)'$ となる．さらに重みを 1 に基準化し，重みベクトル $\boldsymbol{w} = \boldsymbol{w}' \cdot \boldsymbol{I_2}[i \in D_k(\phi)] = (0, 2/3, 1/3)'$ が得られる．ただし，重みベクトルの和は 1 とする．

重みベクトルを i ごとに定義し，観測点の集合 k の観測値からなるベクトルを $\boldsymbol{R_{g,k}(t)}$ とする．観測点 k が囲む領域の降水量は，$\boldsymbol{R_{g,k}(t)}$ を用いて，以下のように示すことができる．

$$R_{g,k}(t) = \boldsymbol{w} \cdot \boldsymbol{R_{g,k}}(t) \tag{3.9}$$

例えば，$k = (1, 2, 3)'$ における観測値が $(10,\ 10,\ 19)'$ であるとき，$\boldsymbol{w} = (0, 2/3$

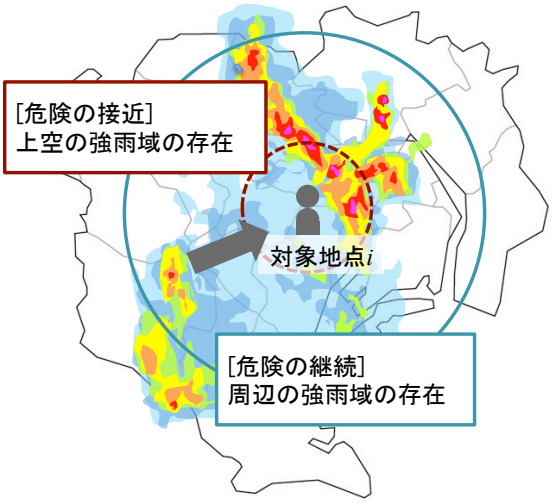


図 3.9 気象レーダから算出する上空，周辺の降水強度と危険の接近，継続

, 1/3) と $\boldsymbol{R_{g,k}(t)} = (10, 10, 19)'$ との行列の内積により，対象地点 i の近傍である観測点 k に囲まれる領域の降水量は 13 となる．このとき，インディケータ $I_2[R_{g,k}(t)]$ は，式 3.7 を用いて，0，1，2，3 のうちの任意の値をとる．

I_3，I_4：上空，周辺のレーダ強度

気象レーダから，上空，周辺の豪雨をもたらす強雨域の影響を算出する．図 3.9 に，上空，周辺の強雨域と豪雨の要因となる危険の接近，継続との関係を示す．上空に強雨域が存在するとき，対象地点に豪雨の危険が接近しており，周辺に強雨域が存在するとき，対象地点に豪雨の危険が継続して起きると考えられる．地点 j における降水強度の観測値は，$r_{r,j}$ で示すことができる．I_3，I_4 の観測範囲は対象地点 i の周囲を囲む半径 T の領域と，平均的な短時間強雨の積乱雲の大きさである 10km を半径とした領域の 2 種類とした．

対象地点 i の周囲を囲む半径 T は，雨量計の空白域であり，観測点が存在しない領域とする．この空白域である半径 Tkm を満たす $j = 1, \cdots, n$ の範囲において，R_rT_i が 0.1mm/h 以上を示す地域がないとき，インディケータ $I_3[R_rT_i]$ は 0，あるとき 1 以上を示す．半径 10km の領域については，この範囲に積乱雲が存在

表 3.3 豪雨に関する指標とインディケータ関数

指標 $P_{Ri}(t)$	インディケータ関数 $I(t)$
危険回避行動	$\exists I_m(I_m = 3)$
行動の制限	$(\exists I_m(I_m \geq 2) \wedge \forall I_m(I_m < 3)) \vee (I_4 = 3)$
日常生活への影響	$(\exists I_m(I_m \geq 1) \wedge \forall I_m(I_m < 2)) \vee (I_4 = 2)$
影響なし	上記以外

する場合，降雨の可能性がある．そのため半径 T =10km とし，式 3.7 を用いて，$R_{r10} = \sum_{i=1}^{n} R_r 10_i$ の値によって，$I_4[R_{r10}]$ は，0，1，2，3 のうちの任意の値をとる．

指標への変換

ここまでに算出した対象地点 i の降水量のインディケータ $I_1[R_{g,i}(t)]$，近傍の雨量計のインディケータ $I_2[R_{g,k}(t)]$，上空，周辺の 2 種類の範囲の降水強度のインディケータ $I_3[R_{r,i}T_k]$，$I_4[R_{r,i}10_i]$ の 4 つから豪雨の影響を示す指標 $P_{Ri}(t)$ の生成を行う．

$P_{Ri}(t)$ は以下の式で示される．

$$P_{Ri}(t) = I[I_1[R_{g,i}(t)], I_2[R_{g,k}(t)], I_3[R_{r,i}T_k], I_4[R_{r,i}10_i]] \tag{3.10}$$

表 B.1（付録 B）にまとめた 4 つのインディケータと豪雨とその指標の対応から，豪雨に関する指標とインディケータ関数の関係を表 3.3 に示す．ここで，$I_1[R_{g,i}(t)]$，$I_2[R_{g,k}(t)]$，$I_3[R_{r,i}T_k]$，$I_4[R_{r,i}10_i]$ をそれぞれ，I_1，I_2，I_3，I_4 と略記する．また，$m = 1, 2, 3$ とする．インディケータ関数を用いて，降雨の開始を $P_{Ri}(t) = I[1, *, 1, *]$，対象地点の付近での降雨の一時的な終了を $I[0, *, 0, 1]$，$I[0, 1, 0, *]$，降雨が終了したことを $I[0, 0, 0, 0]$ と表すことができる．対象地点で閾値を超える降雨が起き豪雨が発生した際は，その指標を $I[3, *, *, *]$，上空や周辺に強雨域があり危険の接近，継続の可能性がある際の指標を $I[*, *, 3, 3]$ のように表せる．

表 3.4 浸水に関する指標

浸水深	屋内	屋外	影響の例（屋内/屋外）
大↑小	危険回避行動	危険回避行動	家屋への浸水の流入/道路の冠水
	-	行動の制限	河川近隣での氾濫の発生
	影響なし	影響なし	影響なし

3.6. 浸水とその指標

本研究では，豪雨と同様に，浸水の影響について現況，周囲の状況（危険の接近，継続）の観点から指標を生成する．浸水の程度を知る目安として，地面から水面までの高さを示す浸水深と，建築物や人間の身長等の対象物の比較が使われる．建築物と浸水深との関係を用いた浸水の表現の例として，床下浸水が発生する 0.5m，床上浸水が発生する 1.0m，建築物の 1 階の軒先が浸かる 2m がある [81]．この浸水深が人の行動に影響を与えるときを浸水の発生と捉え，その際の浸水深を指標化する．

浸水に関する指標を表 3.4 に示す．指標は，表 A.1（付録 A）をもとに浸水が人に与える影響を整理し，指標としてまとめた．本研究では，浸水深が人へ与える影響を分類し，定性的な指標とする．はじめに，軽微な浸水深の浸水が発生した際，屋内にいる人が受ける影響はほとんどない．屋外にいる人にとっても，足下が浸からない程度の浸水であれば，その影響は少ないと考えられる．しかし，浸水深が大きくなるにつれて，屋外にいる人の歩行は困難になる．同時に，屋内にいる人は外出を控える等，行動に制限を受ける．さらに浸水深が大きくなると，家屋への浸水の流入や道路の冠水等，屋内，屋外ともに人命の損失が発生するおそれがあり，危険回避行動をとる必要が出る．

3.7. 浸水に関する指標の妥当性と即時性

浸水に関する指標の生成について図 3.11 に示す．浸水の指標化モデルを用いることで，現況，周囲の状況（危険の接近，継続）の観点から，対象地点についてリ

アルタイムでの被災状況の把握を可能とする．浸水の指標は，河川付近での浸水発生有無の指標，浸水が発生した後，河川から離れた地点で起きる浸水の程度と影響の指標の 2 種類とする．浸水に関する指標は河川水位の観測値を活用して生成する．しかし，河川水位や浸水深の観測は限られた観測点や浸水深のみでしか行われておらず，また河川から離れた地点での浸水深はほとんど観測されていない．そのため浸水の影響を把握する際には観測点以外の空白域の状況把握ができないことが問題となる．空白域に存在する対象地点 i での指標を生成するため，本研究では水位の観測値を収集する．浸水の指標は，実際の河川水位の観測値と河川の流量をもとに算出する．観測値を収集して用いることで，リアルタイムでの推定を実現する．観測値からインディケータ $I_m(t)$ とインディケータ関数 $I(t)$ を導出し，指標を生成する．インディケータ $I_m(t)$ を用いて水位を指標化することで，水位計がない空白域での浸水状況の推定を可能にする．

3.8. 浸水に関する指標の生成手法

3.8.1 浸水に関する指標生成の流れ

浸水に関する指標の生成手法を図 3.10 に示す．指標の生成のために必要となる観測値の収集，空白域でのインディケータの生成，インディケータ関数への変換について順に述べる．はじめに指標を生成するために活用する，河川の水位計，浸水計の観測値，流量，土地の高度，浸水の起こりやすさに関する情報を収集，蓄積する．流量を測定する流量計の設置数は非常に限られているため，雨量計の値を収集し，降水量から流量を算出する．次に，観測値，空白域の河川水位，浸水深，流量，土地の高度，浸水の起こりやすさから地点ごとのインディケータ $I_m(t)$ を生成する．$I_m(t)$ を組み合わせて，インディケータ関数 $I(t)$ へと変換し，$I(t)$ があらかじめ設定した条件に達したとき，浸水が発生したとして指標の生成を行うものとした．

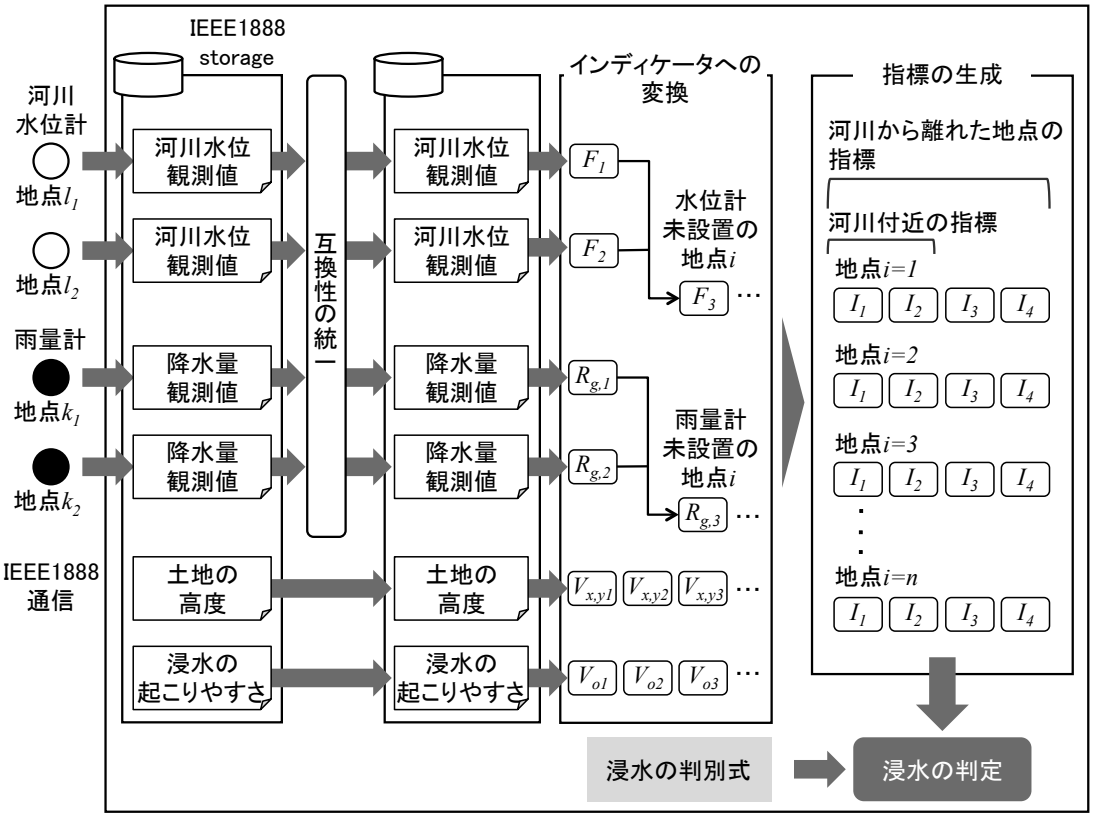


図 3.10 浸水に関する指標生成の流れ

3.8.2 浸水を決定する要因とその閾値

浸水を決定する要因

浸水の影響を決定づける要因として，浸水の現況，周囲の状況（危険の接近，継続）の観点から検討する．これらの要因を観測値から生成するために，対象地点の水位と浸水深，上流からの流入量，土地の高度，浸水の起こりやすさの 4 つを要因として挙げる．時刻 t の観測点 l における水位を用いて，それぞれを算出するための手法を検討する．

はじめに河川付近の浸水の発生有無について，現況で浸水が発生する要因は，時刻 t の河川や水路上の対象地点 i における水位で示すことができる．河川水位を推定し，水位と堤防の高さの差分を余裕高として算出し，余裕高の数値によって，浸

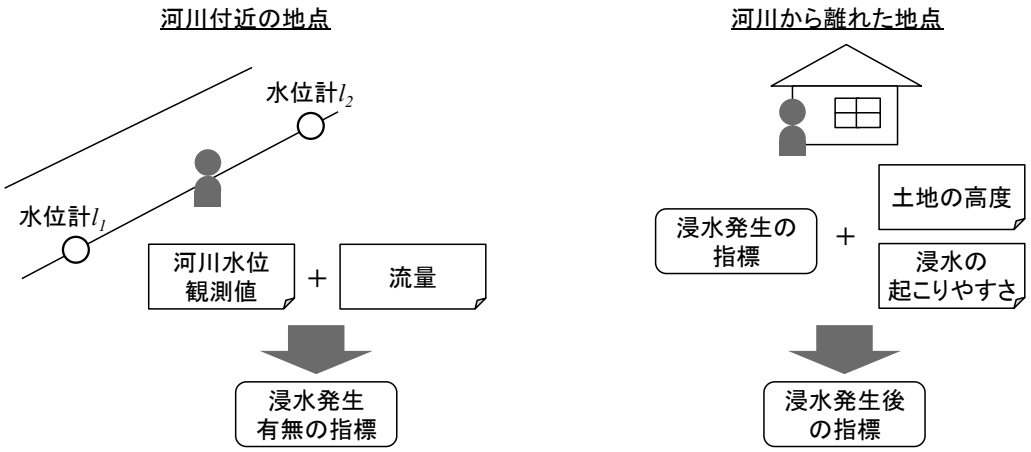


図 3.11 観測値から生成する浸水に関する指標の生成

水の発生有無を決定する．また，危険の接近を決定づける要因として，河川付近の対象地点 i の上流で豪雨が発生しているとき，i の付近で氾濫が発生し，浸水が起きる可能性がある．そのため，河川付近での浸水発生有無は，図 3.11 に示すように観測点 $l = 1, \cdots, n$ のうち，同一河川の隣接する 2 地点の水位計や近傍の雨量計の観測値をもとに浸水の発生を推定する．

河川から離れた地点 l' では，河川付近の観測点 l で浸水が発生したとき，その影響を受ける可能性がある．そのため，河川から離れた地点での浸水の危険を，土地の高度や浸水の起こりやすさを考慮し指標化する．浸水が発生した条件下で，浸水発生後の浸水深として，時刻 t の i における流入量として，河川水位，浸水深，降水量，土地の高度，浸水の起こりやすさから推定する．このことによってすべての地点での浸水の程度とその影響を推定し，指標として生成することが可能となる．そのため，浸水の要因を観測値から生成するために，I_1：河川水位，浸水深，I_2：流入量，I_3：土地の高度，I_4：潜在的な浸水の起こりやすさの 4 つをインディケータとする．時刻 t において各インディケータを算出するための手法を述べる．

浸水の閾値

浸水となる河川水位や浸水深の程度を，本研究では閾値と呼ぶ．表 3.4 に示す浸水の程度を示す閾値の算出について述べる．はじめに，地形，浸水の起こりやす

さから水が土地のどの方向に流れ込むか，流入する水が対象とする地点に入るかを算出する．算出した値と降水量から，降雨や越水による流入量を算出する．その後，流入量の時間変化の数値微分を求める．浸水となる流入量は，河川の幅や流量に応じてその閾値が変動する．時間間隔 $\delta\tau$ の微分値によって，対象の河川や地域に見合った数値微分値を閾値として使用することで変動に影響されない閾値の設定が可能となる．

観測値の収集

水位計の観測値，雨量計が示す降水量の観測値を収集する．各機関から提供される観測値は情報形式や表現形式が機関ごとに異なる．そのため，豪雨に関する指標と同様に，汎用性の高い IEEE1888 通信プロトコルを使用し，各機関から様々な方式で提供される観測値を同じように扱えるようにした上で，インターネットを通じて収集する [79]．収集した観測値は，観測機器によって観測量の単位が異なる．河川水位は，河川によって水位の基準面が異なる．また水位ではなく河川の越水までの残り水位を情報提供している自治体も存在する．そのため収集した観測値は，指標化モデルで変換を行い，情報形式や表現形式を統一することとした．降水量は一般的な観測機器で使用される 1 時間ごとの降水量の 1 分値とし，河川水位は観測点ごとに定められた，危険となる水位と堤防面の差を算出する．

余裕高の算出

はじめに，観測点 l における時刻 t の河川水位 $f_l(t)$ を算出する．ここで $\delta\tau$ は観測間隔である．このとき，時刻 $t-\delta\tau$ から t の間の河川水位 $F_l'(t)$ は $\delta\tau$ での水位の移動平均である．河川水位の変化 $f_l'(t)$ を以下の式で示す．

$$f_l'(t) = \frac{d}{dt} f_l(t) = \lim_{\Delta t \to \delta\tau} \frac{f(t) - f(t-\Delta t)}{\Delta t} \tag{3.11}$$

$f_l'(t)$ の離散値を f_t とすると，f_t を用いて，式 3.11 を用いて，堤防面までの余裕高 $F_l(t)$ は以下の式で示すことができる．

$$F_l(t) = F_l(0) + F_l'(0) - F_l'(t-\delta\tau) - f_t \tag{3.12}$$

このとき，$F_l'(0)$ は余裕高の初期値であり，$F_l(0) + F_l'(0)$ は平常時における基準面から堤防面までの高さを示す．

流量の算出

流入量は降水量から算出する．降水量と流量の関係は流出モデルで表される．ここでは，流出モデルのうち線形モデルである合理式法を用いた [82]．合理式法を用いると，流量は降水量の一次関数から算出され，降水量の増減を流量の増減と比例する．そのため，流量については，対象地点 i における降水量を算出し，その増減としてみなすこととする．観測点 k の近傍の地点 i における時刻 t の降水量 $R_i(t)$ は式 3.3 を用いて，以下の式で示すことができる．

$$R_i(t) = \int_t^{t-\tau} r_i(t)dt = \sum_{i=t-\tau}^{t} r_i(t) \times \frac{\tau}{\delta\tau} \tag{3.13}$$

3.8.3 指標の生成

浸水の判別条件

次に，水位計の設置地点 l, l' における観測値を変換しインディケータを算出する．はじめに，浸水の影響を判別する条件式を構築する．浸水の指標は，浸水の発生有無と浸水発生後の浸水深の 2 つとする．水位や，浸水深を F とし，浸水の判別条件を定数 b_τ を用いて以下に示す．なお，$b_{1,\tau}$，$b_{2,\tau}$，$b_{3,\tau}$ は，定数 b_τ より小さい任意の値をとる．

$$I_1[F] = \begin{cases} 0 & (F(t) = b_{1,\tau}) \\ 1 & (b_{1,\tau} < F(t) \leqq b_{2,\tau}) \\ 2 & (b_{2,\tau} < F(t) \leqq b_{3,\tau}) \\ 3 & (b_{3,\tau} < F(t)) \end{cases} \tag{3.14}$$

浸水発生有無の場合の定数 b_τ は河川管理機関で定めた各観測点における水位と警報の発表基準の余裕高を用いる．0，1，2，3 の数値を順に平常状態，水位の上昇，氾濫の可能性あり，氾濫の発生を示すものとする．なお，b_τ は河川や地点ご

とに異なる値をとる．また，浸水発生後の浸水深の場合，0，1，2，3 まで，浸水深ごとに b_τ を設定する．

I_1：河川水位，浸水深

豪雨に関する指標と同様に，式 3.14 を用いて河川付近の観測点 l での河川水位の余裕高である $F_l(t)$ の値によって，インディケータ $I_1[F_l]$ は，0，1，2，3 のうちの任意の値をとる．さらに観測点のインディケータから水位計の未設置である対象地点 i でのインディケータを算出する．未設置地点のインディケータはその両隣 2ヶ所の水位観測点 l で算出したインディケータの中央値を用いる．例えば水位の観測点 $l = 1, 2$ のインディケータがそれぞれ 4，2 であったとき，$l = 1, 2$ 間の対象地点 i では，$I_1[F_i] = 3$ となる．また，浸水発生後には，河川から離れた浸水深の観測点 l' での浸水深は，浸水の観測値 $f_{l'}(t)$ の移動平均から $F_{l'}(t)$ と求められる．対象地点 i での浸水深のインディケータは，2ヶ所以上の観測点における観測値の中央値から求め，$F_{l'}(t)$ の値によって，インディケータ $I_1[F_i]$ は，0，1，2，3 のうちの任意の値をとる．

I_2：流入量

インディケータ $I_2[R_i]$ は，式 3.7 を利用して，降水量 a_τ に応じて 0，1，2，3 のうちの任意の値をとる．このとき対象地点 i と，近傍の降水量の観測点 k の位置によって重み付けを行う．対象地点 i が観測点 k の上流に存在するとき，観測点 k は上流である対象地点 i の降雨の影響を受ける．しかし，対象地点 i が観測点 k の下流に存在するとき，観測点 k は下流である対象地点 i の降雨による浸水への影響は受けにくい．そのため，インディケータ $I_2[F_k]$ は重み付けベクトルを用いて，

$$I_2[F_i] = \boldsymbol{w} \cdot \boldsymbol{I}[R_i] \tag{3.15}$$

で表す．重み付けベクトルは

$$\boldsymbol{w} = \begin{cases} \hat{\boldsymbol{w}} & (\text{対象地点 } i \text{ が観測点 } k \text{ の上流}) \\ \vec{0} & (\text{対象地点 } i \text{ が観測点 } k \text{ の下流}) \end{cases} \tag{3.16}$$

となる．

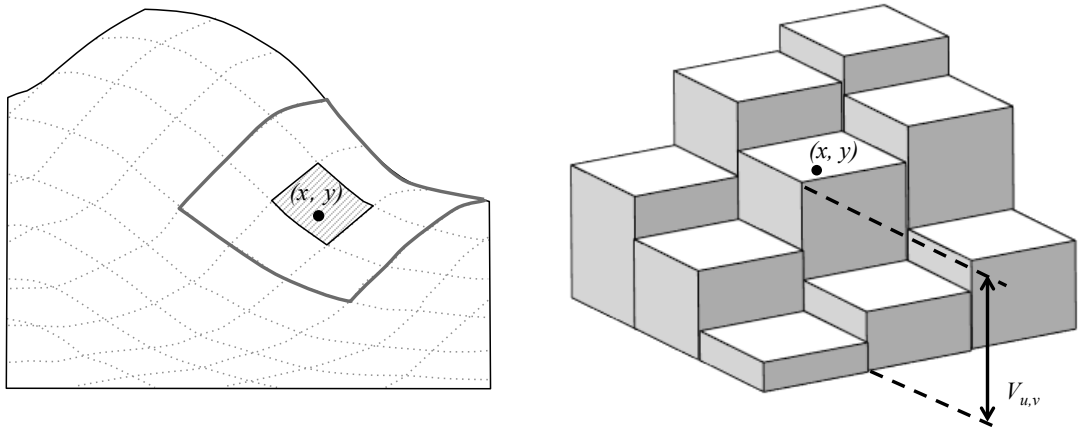


図 3.12 対象領域の離散平面への分割

I_3：環境要因：土地の高度

浸水に影響を及ぼす環境要因として，対象地点の高度からインディケータを算出する．対象地点の周囲の凹凸をインディケータとすることで，浸水の起こりやすさを決定する．はじめに，図 3.12 に示す領域 D に存在する対象地点 $i : (x, y)$ の高度 $V_{x,y}$ を求めるため，対象地域を特定長 W の格子に区切り，大きさ $W \times W$ の離散平面に分割する．対象地点 (x, y) を含む格子を u, v とし，その高度 $V_{u,v}$ と周囲 8 格子の高度とを比較し，高度のインディケータを決定する．

次に，図 3.13 に示す 8 近傍ラプラシアンフィルタを用いて，高度の重み付けを行う．各格子の係数 $g_{V_{u,v}}$ を算出し，$V_{u,v}$ と周囲の高度を比較する．算出には，以下の式を用いる．

$$\begin{aligned} g_{V_{u,v}} &= V_{u-1,v-1} + V_{u,v-1} + V_{u+1,v-1} + V_{u+1,v} + V_{u-1,v} \\ &+ V_{u+1,v-1} + V_{u+1,v-1} + V_{u,v+1} + V_{u+1,v+1} + (-8) \times V_{u,v} \end{aligned} \tag{3.17}$$

$g_{V_{u,v}}$ に応じてインディケータ $I_3[V_{x,y}]$ は，0，1，2，3 のうちの任意の値をとる．この操作を領域 D のすべての格子について繰り返し行う．ある格子の高度と比べその周囲すべての高度の方が大きかった場合，対象地点は窪地であり，$I_3[V_{x,y}]$ は最大の 3 となる．

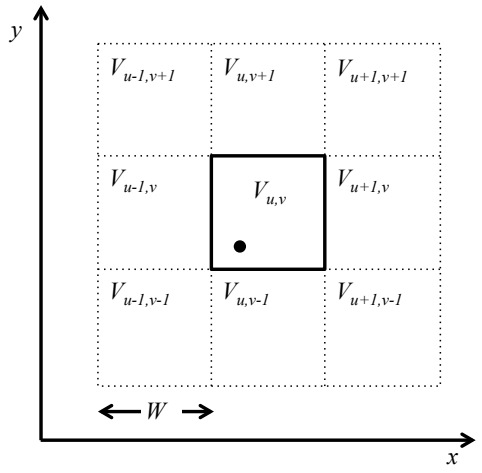


図 3.13 8 近傍ラプラシアンフィルタによる高度の重み付け

I_4：環境要因：潜在的な浸水の起こりやすさ

浸水履歴から対象地点 i における浸水の起こりやすさをインディケータ $I_4[V_o]$ として算出する．このインディケータには河川からの距離や土地の形状が考慮される．浸水履歴 V_o は過去の浸水状況から得られる予想水深を，0，1，2，3 の 4 段階のインディケータに変換した．浸水の起こりやすさは，河川の形状や河川からの距離，建築物の形状，道路の形状等に影響される．ハザードマップの浸水想定域計算には，これらに対応する地形条件や洪水実績，流域の土地利用状況（建物占有率，構造物の有無）盛土（主要道路，鉄道，堤防）が含まれることに着目し，活用することとした．対象地点 i において，ハザードマップが示す浸水想定のランク区分を算出し，ランク区分をもとに $I_4[V_o]$ を 0，1，2，3 までの 4 段階に変換する．

指標への変換

ここまでに算出した対象地点 i の河川水位，浸水深のインディケータ $I_1[F_i]$，近傍の降水量のインディケータ $I_2[F_k]$，土地の高度，浸水の起こりやすさのインディケータ $I_3[V_{x,y}]$，$I_4[V_o]$ の 4 つから浸水の影響を示す指標 $P_{Fi}(t)$ の生成を行う．

表 3.5 浸水に関する指標とインディケータ関数

指標 $P_{Fi}(t)$	インディケータ関数 $I(t)$	
	浸水発生有無	浸水発生後
危険回避行動	$I_1 = 3$	$(I_1 = 3) \wedge \exists I_{m2}(I_{m2} \geq 2)$
行動の制限	$\forall I_{m1}(I_{m1} \geq 2)$	$(I_1 = 2) \wedge \exists I_{m2}(I_{m2} \geq 2)$
影響なし：浸水の発生あり	-	$I_1 = 1$
影響なし	上記以外	

$P_{Fi}(t)$ は以下の式で示される．

$$P_{Fi}(t) = I[I_1[F_i], I_2[F_i], I_3[V_{x,y}], I_4[V_o]] \tag{3.18}$$

表 B.2，表 B.3（付録 B）にまとめた 4 つのインディケータと浸水とその指標の対応から，浸水に関する指標とインディケータ関数の関係を表 3.5 に示す．ここで，$I[I_1[F_i]$，$I_2[F_i]$，$I_3[V_{x,y}]$，$I_4[V_o]$ をそれぞれ，I_1，I_2，I_3，I_4 と略記する．また，$m_1 = 1, 2$，$m_2 = 3, 4$ とする．$P_{Fi}(t) = I[0, 0, *, *]$ のとき，河川水位は平常時と同様であり，指標は河川付近に浸水による危険がないことを示す．従って，河川から離れた地点でも浸水による危険がない．$I[(1 \vee 2), \neg 3, *, *]$ のとき，河川付近では危険が接近し浸水となる可能性があるが，浸水は発生していないため，河川から離れた地点の危険はない．$I[3, *, *, *]$ のとき，河川付近では氾濫が発生しており，河川から離れた地点でも浸水が起きる可能性がある．$I[3, \neg 0, \neg 0, \neg 0]$ であるとき，インディケータの値が大きいほど危険が大きいことを示す．

第4章
指標化モデルによる指標とその情報提供の評価

4.1. 豪雨に関する指標の評価

4.1.1 評価に用いた観測値

2011年，2012年に東京都23区で0mm以上の降雨があった224日のうち，積算降水量が25mm以上であった降雨日32日の観測値を用いて推定値と指標を生成する．降雨日を降水量に従って3群に分け，評価を行った．10分最大降水量が10mm以上である短時間に激しい降雨を観測した降雨日をA群，10分最大降水量が10mm未満かつ1時間最大降水量が10mm以上である降雨日をB群，10分最大降水量，1時間最大降水量が10mm未満である降雨日をC群とした．A群は短時間強雨によって起きる激しい降雨であり，B群は梅雨前線や台風の影響で起きる激しい降雨，C群はその他の長時間に及ぶ降雨を示す．

表 4.1: 評価に用いた降雨日

年月日	積算降水量 (mm)	1時間最大降水量 (mm)	10分最大降水量 (mm)	評価群
2011年5月29日	69.5	12.5	3.5	B
6月11日	35.5	13.0	3.0	B
6月13日	29.5	11.0	3.0	B
7月30日	29.0	18.5	8.5	B
8月19日	57.0	31.5	8.5	B

[次頁に続く]

表 4.1: 評価に用いた降雨日（続き）

年月日	積算降水量 (mm)	1 時間最大降水量 (mm)	10 分最大降水量 (mm)	評価群
8 月 22 日	26.0	10.5	3.0	B
8 月 26 日	88.5	55.0	16.5	A
9 月 2 日	27.0	14.5	11.5	A
9 月 20 日	21.0	5.0	2.0	C
9 月 21 日	124.0	28.0	10.5	A
10 月 5 日	53.5	6.5	1.5	C
11 月 19 日	78.0	12.0	3.0	B
12 月 3 日	35.0	7.5	2.0	C
2012 年 2 月 7 日	28.5	6.0	2.0	C
3 月 5 日	37.0	5.5	1.5	C
3 月 9 日	26.5	2.5	0.5	C
4 月 14 日	32.0	3.5	1.0	C
4 月 27 日	26.5	4.0	1.0	C
5 月 2 日	37.0	6.0	1.5	C
5 月 3 日	121.5	17.0	4.0	B
5 月 22 日	33.0	5.5	1.5	C
6 月 9 日	29.5	5.0	1.5	C
6 月 19 日	72.5	20.5	5.0	B
6 月 22 日	48.0	30.0	6.5	B
7 月 14 日	41.0	18.5	7.5	B
9 月 19 日	36.0	24.5	16.0	A
9 月 23 日	45.5	7.5	2.5	C
10 月 4 日	30.0	27.0	13.5	A
11 月 6 日	41.0	12.0	3.5	B
11 月 17 日	60.5	19.5	6.0	B

[次頁に続く]

表 4.1: 評価に用いた降雨日（続き）

年月日	積算降水量 (mm)	1 時間最大降水量 (mm)	10 分最大降水量 (mm)	評価群
11 月 26 日	26.0	13.5	4.5	B
12 月 30 日	40.0	11.5	2.5	B

雨量計として気象庁，東京都，LiveE!プロジェクトの観測点 65 地点，気象レーダとして防災科学技術研究所が運用している X バンドマルチパラメータレーダで観測された，それぞれ観測間隔 $\delta\tau = 1$（分）の観測値を使用した [46] [48] [50] [52]．評価に使用した雨量計が設置されている地点の分布を図 4.1 に示す．文京区，台東区等の雨量計が設置されていない区を除き，雨量計の設置間隔は，東京都 23 区にほぼ均等に分布している．平均の分布間隔は 2.4km となる．

4.1.2 豪雨の推定値の評価

豪雨の推定値の評価方法

観測点 65 地点のうち，任意の 1 つの観測点を空白域の対象地点 i とみなし，最近傍の観測点 k から雨量係数を求め，地点 i での推定値を生成する．算出した降水量の推定値 $R_{g,i}$ と実際に得られた地点の観測値 $R_{g,i=k}$ から相関係数を算出し，推定値と実測値の比較を行う．以上の操作を $k = 1$，…, 65 のすべての地点で繰り返し行い，相関係数の中央値を求める．

時間幅の検討

式 3.5 を用いて，時間幅 $\tau = 5, 10, 30, 60$（分）における A 群，B 群，C 群の雨量係数 μ を算出した．表 4.2 に μ の平均値を示す．μ が 1 に近いとき，雨量計の降水量と気象レーダの降水強度の値が近く，降水強度に位置のずれが生じていないことを示す．表 4.2 から，A 群，B 群，C 群ともに $\tau = 5, 10$（分）のとき平均値は最も 1 に近い値をとった．これは τ が大きくなるほど降水量の絶対値は大きくなるためと考えられる．τ が大きく，降水強度と降水量にずれがある場合，μ は 1 から

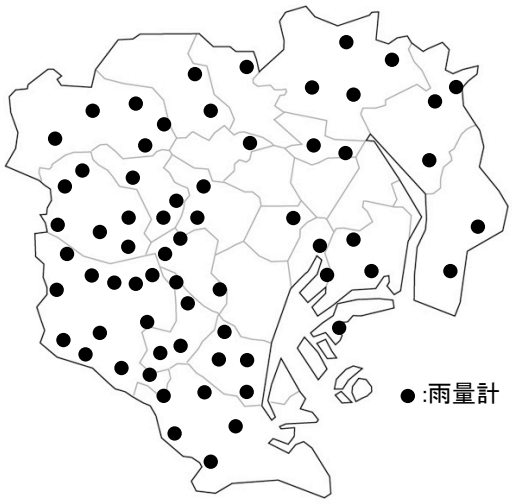


図 4.1 評価に使用した雨量計の設置分布

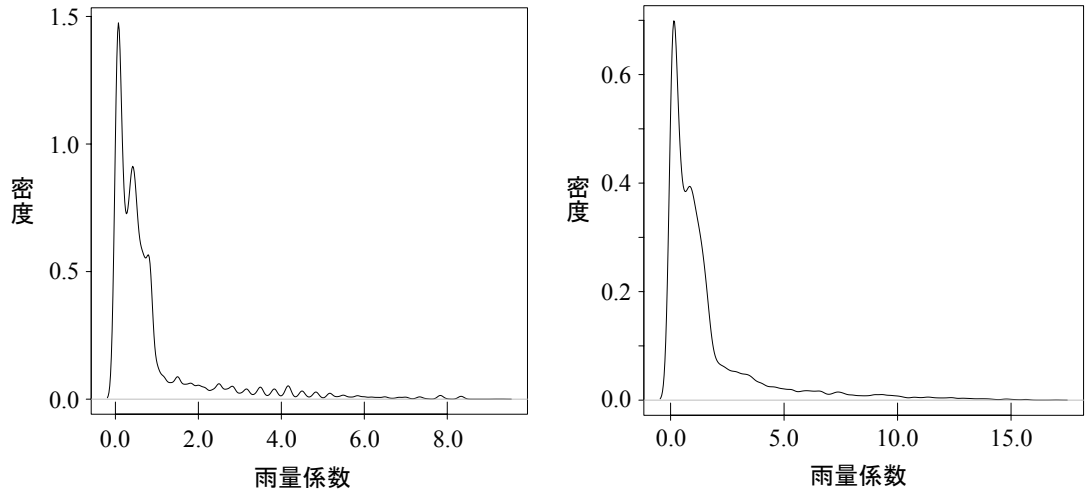
表 4.2 雨量係数 μ の平均値

	A 群	B 群	C 群
$\tau = 5$	0.76	0.22	0.64
$\tau = 10$	0.73	0.51	0.61
$\tau = 30$	0.60	0.43	0.55
$\tau = 60$	0.56	0.38	0.49

離れた値をとる．そのため，$\tau = 5, 10$（分）のとき，降水量と降水強度の値が近いと考えられる．ここからは，時間幅として $\tau = 5, 10$（分）を用いて評価を行う．

雨量係数 μ の評価

A 群，B 群，C 群についてカーネル密度推定を用いて求めた雨量係数 μ の分布をそれぞれ図 4.2，図 4.3，図 4.4 に示す．なお，降雨が観測されず $\mu = 0$ となった際の μ は除いて算出している．A 群，B 群，C 群で，$\tau = 10$（分）のとき μ は 1 付近に最も多く分布した．しかし，$\tau = 5$（分）では，A 群，B 群，C 群ともに 1 より小さい値を示した．これは降水強度より実際の観測値が小さかったことを示



(a) 時間幅 $\tau = 5$（分）　　(b) 時間幅 $\tau = 10$（分）

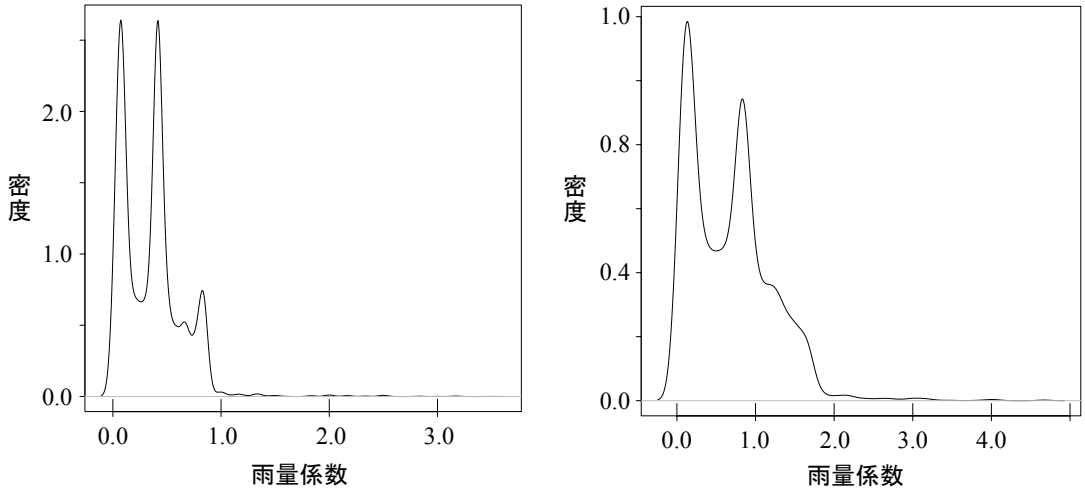
図 4.2　A 群：カーネル密度推定を用いて求めた雨量係数 μ の分布

している．

推定値の評価

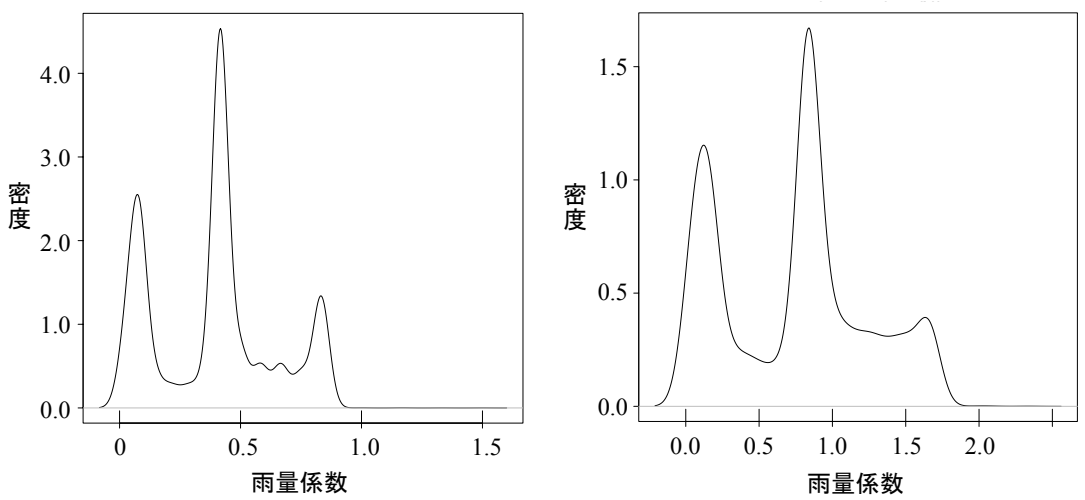
式 3.6 を用いて，A 群，B 群，C 群の推定値を生成した．それぞれの推定値と雨量計の観測値との関係を表 4.3 に示す．表 4.3 から A 群では $\tau = 10$（分）のとき，相関係数は 0.75 以上となりかなり高い相関がみられ，$\tau = 5$（分）でも 0.64 となり高い相関が確認された．また，$\tau = 10$（分）のとき，B 群，C 群の相関係数が 0.6 以上の高い相関となり，$\tau = 5$（分）ではそれぞれ，0.43，0.32 となり弱い相関がみられた．このことから，実際の観測値と相関のある推定値が算出できた．特に，$\tau = 10$（分）のとき高い相関をもつ推定値を算出している．

A 群，B 群，C 群のうち，2011 年 9 月 21 日，6 月 11 日，10 月 5 日の観測値と推定値の相関，最小二乗法を用いて算出した回帰直線を，図 4.5，図 4.6，図 4.7 に示す．図 4.5 の A 群では，降水量は 0 から 10 までに分布し，特に $\tau = 10$（分）のとき，降水量に関わらず回帰直線の傾きは 1 に近くなった．しかし，図 4.6，図 4.7 の B 群，C 群では，降水量は 0 から 4 までの区間に集中し，傾きは 1 以上の値，もしくは 1 以下の値を示した．降水量が小さいとき，推定値と観測値との相関は高



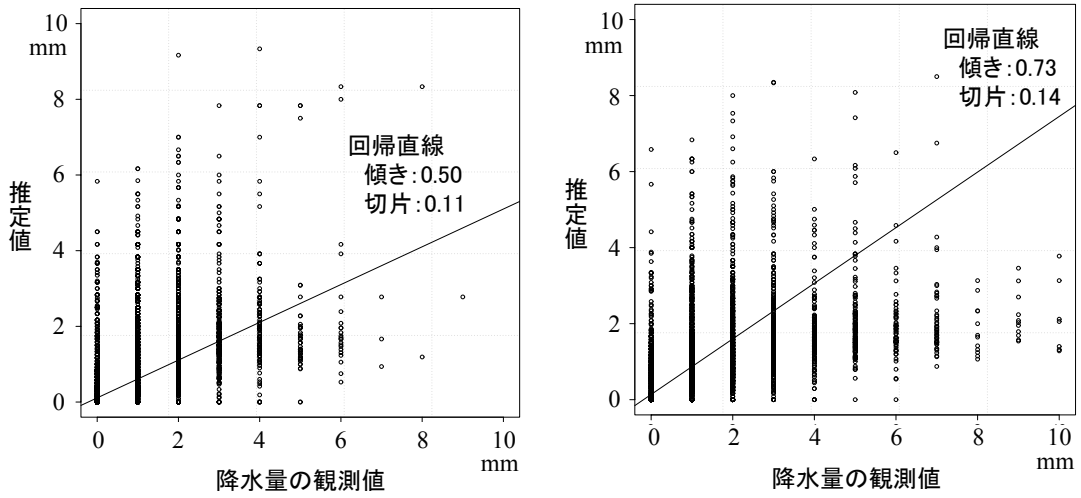
(a) 時間幅 $\tau = 5$（分）　　(b) 時間幅 $\tau = 10$（分）

図 4.3　B 群：カーネル密度推定を用いて求めた雨量係数 μ の分布



(a) 時間幅 $\tau = 5$（分）　　(b) 時間幅 $\tau = 10$（分）

図 4.4　C 群：カーネル密度推定を用いて求めた雨量係数 μ の分布



(a) 時間幅 $\tau = 5$（分）　　(b) 時間幅 $\tau = 10$（分）

図 4.5　A 群：対象地点における降水量の推定値

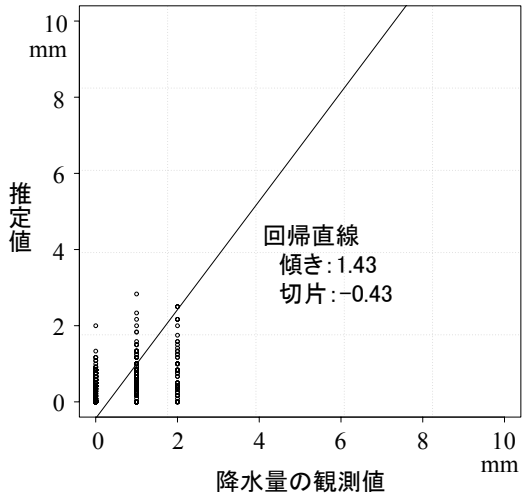
表 4.3　観測値と推定値の相関

	A 群	B 群	C 群
$\tau = 5$	0.64	0.43	0.32
$\tau = 10$	0.76	0.63	0.61

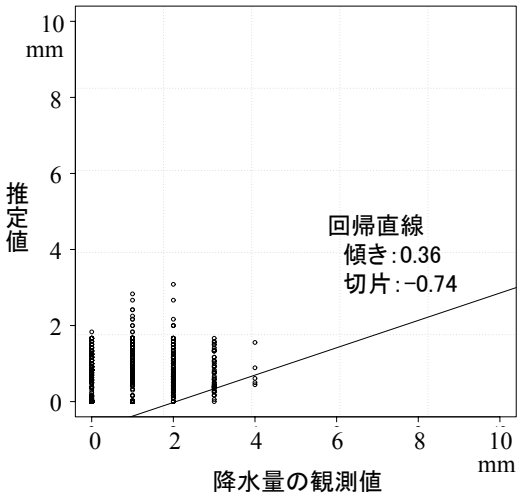
くなく，観測値より大きい値，もしくは小さい値で推定値が算出される．

推定値と解析雨量の比較

各降雨日における空白域の推定値を算出し，推定値と実際の観測点での観測値の相関係数 c_s，各観測点における解析雨量と観測値との相関係数 c_p を求めた．降雨日は A 群，B 群のうち，2011 年 8 月 19 日，8 月 26 日，9 月 21 日の 3 日間の観測値を用いて，生成した推定値と指標の評価を行った．推定値の算出にかかる計算時間は 1 地点あたり 47 ミリ秒だった．使用した全観測点 65 地点中の c_s，c_p の最大値と中央値を表 4.4 に示す．算出の結果，c_s は最大 0.92，中央値が 0.7 以上の値が得られた．また，雨量計の分布密度を 1/2，1/4 倍とした 33 地点，17 地点での相

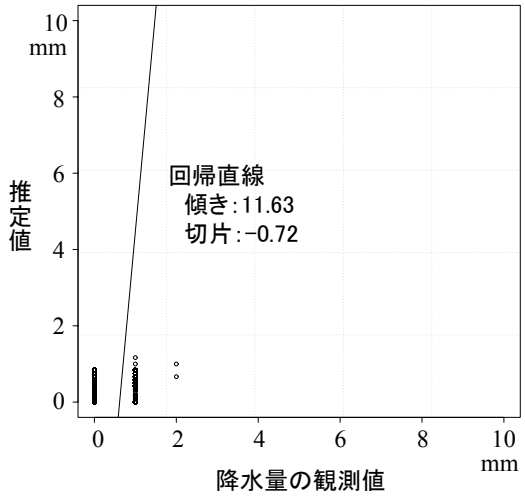


(a) 時間幅 $\tau = 5$（分）

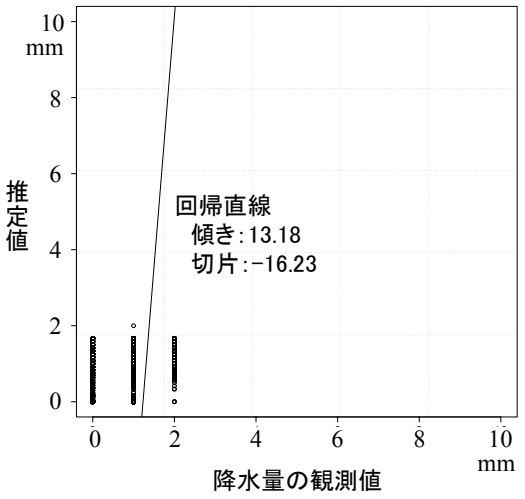


(b) 時間幅 $\tau = 10$（分）

図 4.6 B 群：対象地点における降水量の推定値



(a) 時間幅 $\tau = 5$（分）



(b) 時間幅 $\tau = 10$（分）

図 4.7 C 群：対象地点における降水量の推定値

関係数の中央値は 65 地点を用いたときの相関係数の中央値より小さくなった．なお，降水量の 1 時間値を 5 分あたりの降水量に換算している．

推定値に関する考察

表 4.4 より，本研究の手法を用いて生成した空白域の推定値と実測値の相関係数として，最大値，中央値ともに高相関である 0.7 以上の値が得られた．また，雨量計の密度が高いほど，相関係数は高い値を示した．c_s と c_p の最大値を比較すると，ほぼ同程度となった．また，中央値では c_s が大きい値となった．このことから，本研究で生成した推定値は解析雨量と遜色ない数値で算出でき，複数の観測網から得られる観測値を組み合わせること，雨量計の密度を高くすることで，精度を向上できる可能性があることがわかった．

c_p の中央値が極めて低くなった理由として，位置のずれや生成のタイミングのずれが考えられる．解析雨量は位置や時間にずれが生じることが知られている．特に位置は 1km から 2km のずれが生じることがある．位置の補正を行った解析雨量と気象庁の雨量計との相関係数は 0.7 以上の値となる [83]．本評価では位置の補正を行っていないため，c_p の値にばらつきが出たと考えられる．また，本評価では都市域での観測値を用いている．都市域では，高層ビルが建ち並び土地利用が複雑であるため狭い地域で急激な気象変化が生じる．そのため 30 分おきに算出する解析雨量では，降雨状況を反映しにくく，低い相関係数となる観測点が存在し，c_p に影響したと考えられる．

また，実際の観測値と生成した推定値は降水量の大小に関わらず，対応していることがわかった．一方で，観測値と推測値に差が生じた観測点も存在した．これは推定値の生成に用いた最近傍の雨量計と対象地点との降雨状況が異なった場合に降水量に差が生じたと考えられる．

以上のことから本手法で推定値を算出したところ，差が生じる場合はあったものの，A 群，B 群の短時間強雨，梅雨前線や台風の気象現象から生じる降雨について従来用いられている解析雨量と同等の高相関で観測点以外の地点の降水量を推定できた．また解析雨量の算出は 30 分おきであるが，本手法の推定値の 1 地点あたりの算出時間は 47 ミリ秒となった．つまり，本手法の推定値は同程度の精度

表 4.4 本研究の推定値と解析雨量の相関係数の比較

降雨日	c_s				c_p	
	最大値	中央値			最大値	中央値
	1/1	1/1	1/2	1/4	1/1	1/1
8 月 19 日	0.85	0.77	0.53	0.43	0.85	0.38
8 月 26 日	0.92	0.74	0.67	0.63	0.91	-0.04
9 月 21 日	0.81	0.71	0.70	0.69	0.80	-0.01

表 4.5 観測値と近傍の降水量の相関

	A 群	B 群	C 群
$\tau = 5$	0.69	0.55	0.43
$\tau = 10$	0.80	0.68	0.69

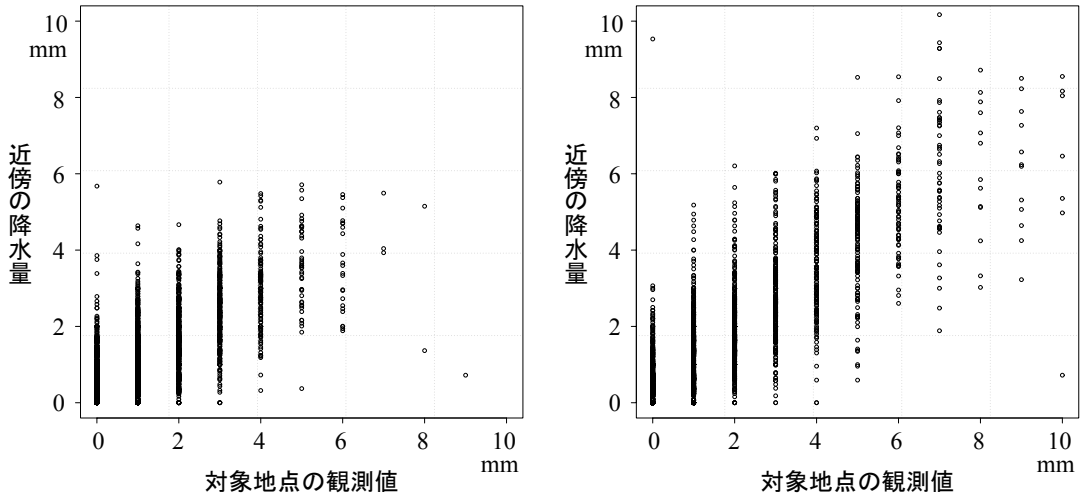
で即時性の高い降水量の算出ができる可能性があることがわかった.

4.1.3 指標の評価

近傍の降水量の生成

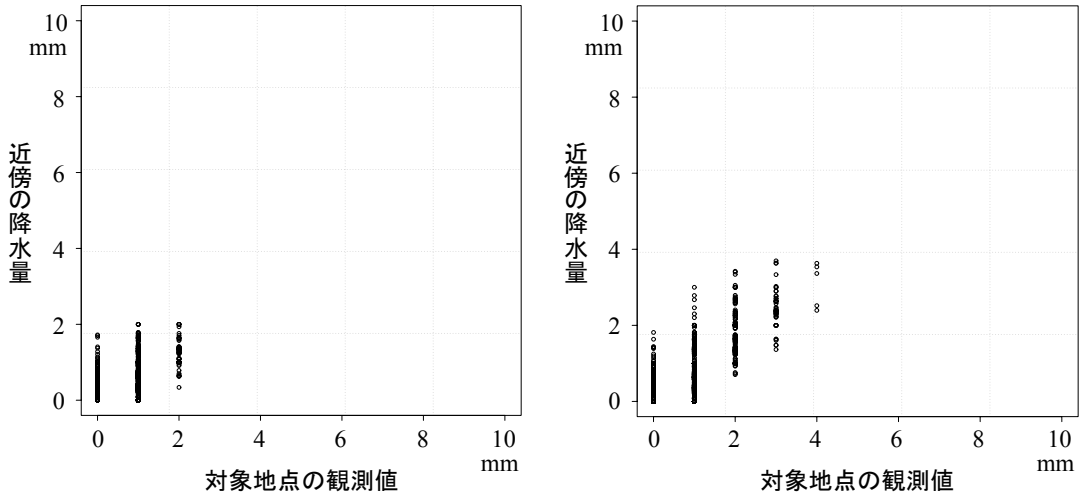
A 群，B 群，C 群の降雨日について，式 3.9，式 3.7 を用いて近傍の雨量を生成した．それぞれの観測値と近傍の降水量の相関を表 4.5 に示す．A 群，B 群，C 群で，$\tau = 10$（分）のときの相関係数はそれぞれ 0.80，0.68，0.69 となり高い相関がみられた．$\tau = 5$（分）のときは 0.69，0.55，0.43 となり，相関が確認された.

A 群，B 群，C 群のうち，2011 年 9 月 21 日，6 月 11 日，10 月 5 日の観測値と近傍の降水量の相関を，図 4.8，図 4.9，図 4.10 に示す．図 4.9 の $\tau = 5$（分），図 4.10 の $\tau = 5, 10$（分）のとき，降水量は 2mm 以下の小さい値を示す．これは，降水量が小さい範囲に分布し，相関係数が小さくなったためと考えられる．また，降水量が大きくなった A 群では，10mm までの範囲に分布し，0.80 の高相関がみられた.



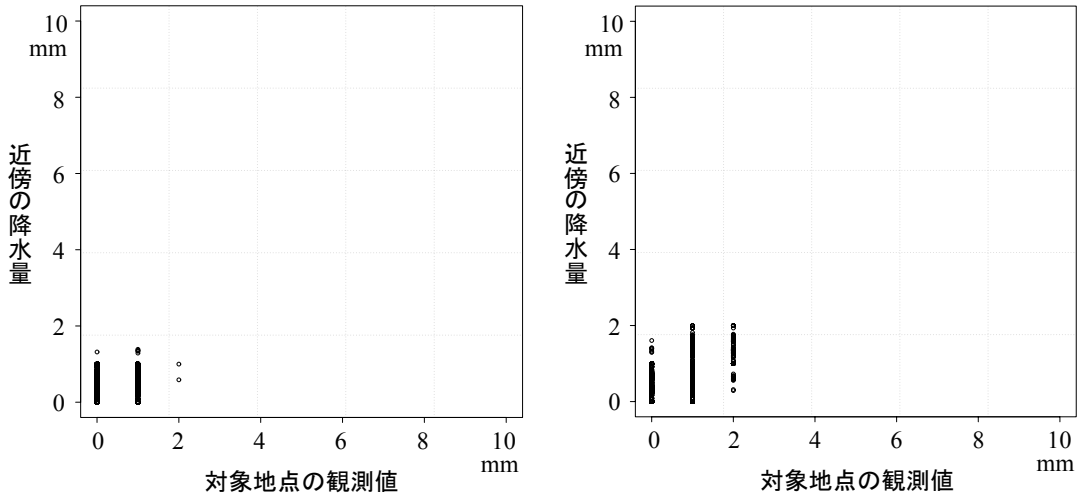
(a) 時間幅 $\tau = 5$（分）　(b) 時間幅 $\tau = 10$（分）

図 4.8　A 群：対象地点と近傍の降水量の散布図



(a) 時間幅 $\tau = 5$（分）　(b) 時間幅 $\tau = 10$（分）

図 4.9　B 群：対象地点と近傍の降水量の散布図



(a) 時間幅 $\tau = 5$（分）　(b) 時間幅 $\tau = 10$（分）

図 4.10　C 群：対象地点と近傍の降水量の散布図

指標の生成タイミング

指標の算出にかかる計算時間を測定し，計算時間を考慮した一定間隔での指標の算出と，指標と降雨の比較を行った．降雨の実測値として同日に観測された雨量計の観測値を用いた．求める指標の地点数は東京都 23 区を含むし地域を格子状に分割した 640 地点とした．一般的な降雨をもたらす積乱雲の水平方向の大きさは数 km〜十数 km でありひとつの積乱雲で最大 400km^2 の範囲が降雨となる可能性がある [84]．指標の空間分解能を使用する X バンドマルチパラメータレーダの空間分解能と同様に 250m^2 と設定すると約 640 地点に分割できることからこの地点数の指標を算出した．640 地点における指標の生成を 10 回試行したところ，観測値の収集にかかった時間として最大 60 秒，推定値の生成には平均 28 秒，指標の生成には平均 64 秒の計算時間がかかり，合計で 152 秒となった．

指標の評価

指標化モデルを用いて，指標 $P_{Ri}(t)$ の生成を行い，観測値と比較する．はじめに，観測値を a_τ に基づいて 0，1，2，3 の 4 段階に分類した．つまり，降水量の観

測値を指標と同じランクに当てはめた値とする．算出した指標と実測値である各地点の雨量計の観測値との関係を述べる．最も積算降水量の多かった 2011 年 9 月 21 日について，1 地点の観測値と指標の関係を図 4.11 に示す．

図 4.11(a) から，降水量は 0:40，4:20，15:00，16:40 にそれぞれ 5mm 以上の降雨，12:30 に 7mm の降雨を観測した．降水の危険を判別するための定数は $a_\tau = 7$ とし，$a_{\tau,3} = 7$，$a_{\tau,2} = 5$，$a_{\tau,1} = 3$ と定めた．生成した指標を図 4.11(b) に示す．5mm 以上の降水を観測した 0:40，4:20，15:00，16:40 で指標 $P_{Ri}(t) = 2$ となり，7mm の降雨を観測した 12:30 に，$P_{Ri}(t) = 3$ となっている．観測値が，$a_{\tau,2} = 5$ より低い値を示した際の指標 $P_{Ri}(t) = 1$ となった．降水の変化に合わせて指標も値も変化している．しかし，指標と観測値には完全な一致はみられず，観測値から算出したランクと比べ低い値として指標の算出が行われた時間があった．

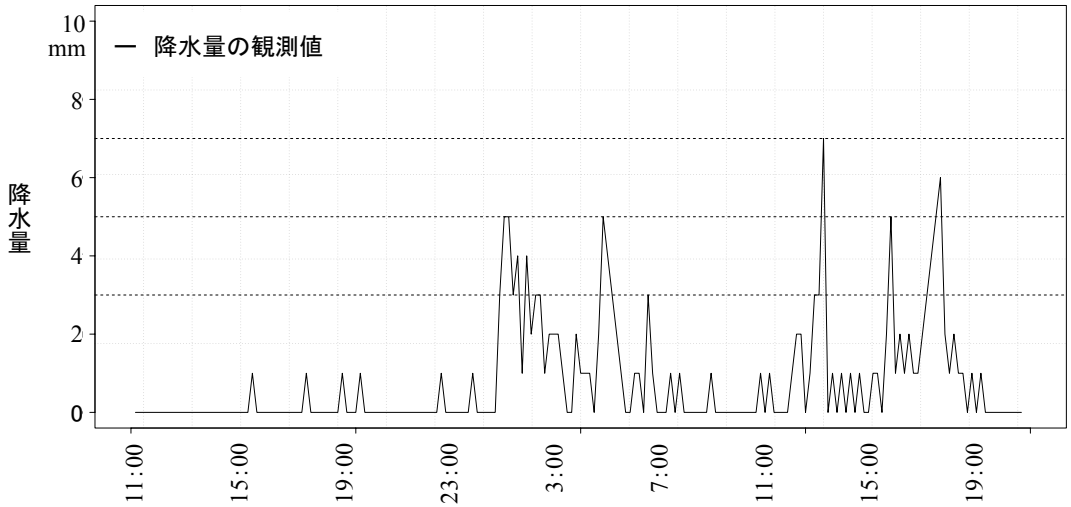
4.2. 浸水に関する指標の評価

4.2.1 浸水に関する指標（浸水発生有無）の評価

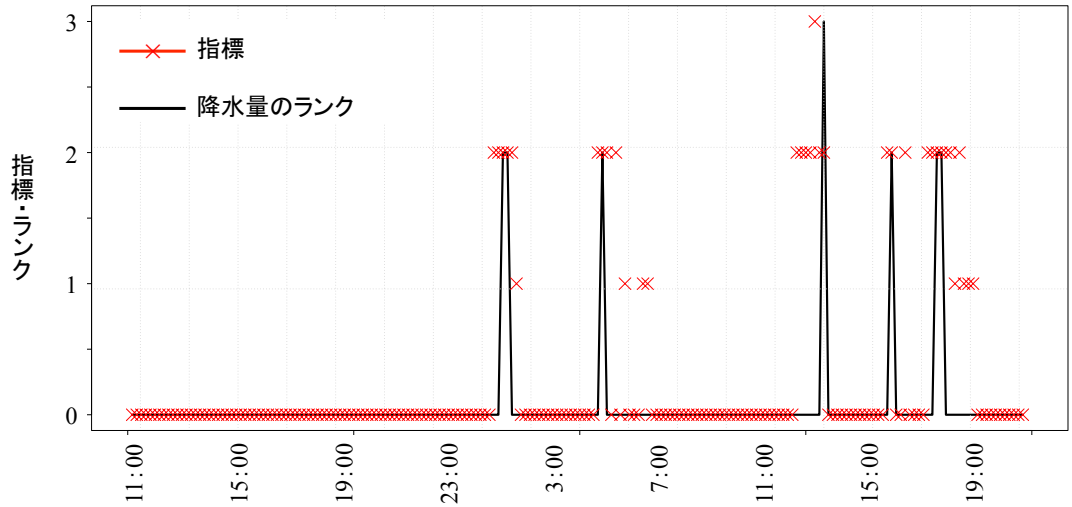
指標の評価方法

提案する指標化モデルを用いて生成した浸水に関する指標の評価について述べる．浸水に関する指標の評価は，浸水の発生有無と浸水の発生後の 2 つに分けて行った．はじめに，浸水の発生有無について指標の評価を行う．表 4.1 の降雨日について東京都 23 区内の河川水位と降水量の観測値を用いて，空白域の浸水の程度とその影響をリアルタイムで示す指標を生成した．水位計として東京都が神田川に設置している観測点 3 地点で観測されたそれぞれ観測間隔 $\delta\tau = 1$（分）の観測値を使用した [52]．なお，3 点間の河川の形状はほぼ直線となっている．降水量はそれぞれの水位計の最近傍に設置された雨量計の観測値を用いた．

中央に位置する観測点を水位計の未設置地点である地点 s_3 とみなし，両端の観測点を地点 s_1，s_2 とした．はじめに，地点 s_1，s_2 の観測値から地点 s_3 における河川水位，流量を算出し，同時刻における 2 つの中央値を指標として扱う．次に，地点 s_3 の実測値から河川水位，流量のインディケータを算出し，中央値から指標を生成した．地点 s_1，s_2 の観測値の観測値から求めた指標と，地点 s_3 における実測



(a) 降水量



(b) 指標の比較

図 4.11 観測値と豪雨に関する指標の関係

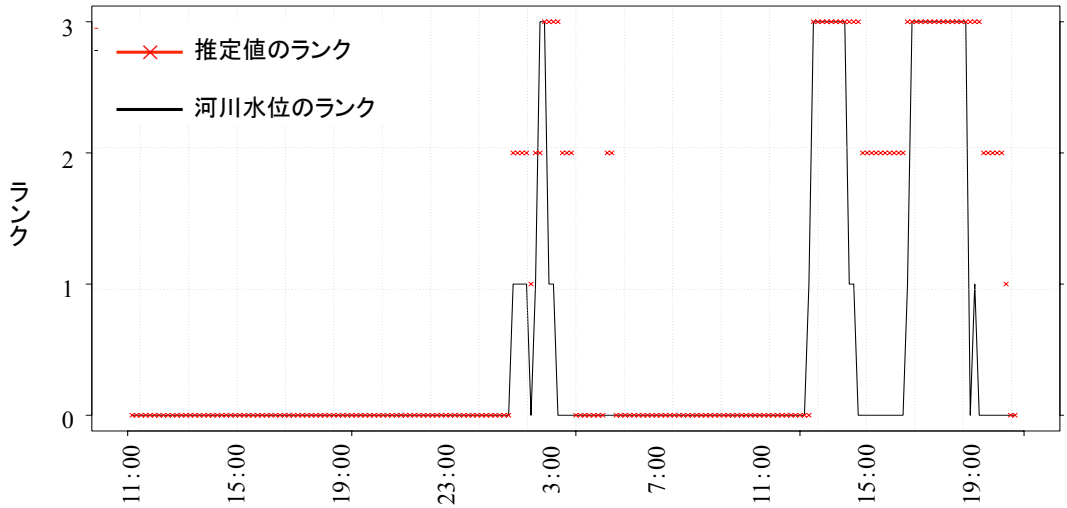


図 4.12 河川水位と推定値の比較

値から生成した指標を比較し，生成した指標と実際の河川水位との相関を調べた．なお，河川水位の観測値が，浸水の判別条件 b_τ を越えなかったため，それぞれの b_τ を 1/5 倍した値を判別条件として用いている．

推定値の評価

実際に観測された河川水位と推定値の関係を図 4.12 に示す．河川水位の観測値，推定値は，b_τ に基づいて分類し，指標と同じランクに当てはめた値を用いている．1:10 に水位の観測値が上昇し，同時に推定値も上昇した．その後，2:10，12:20，16:00 に水位が上昇すると，推定値も 3 の値を示した．また，水位が下降したときは，推定値は 2 に保たれ値は下がらなかった．ここで水位が上昇すると推定値も上昇することが示された．表 4.6 に観測値と推定値の相関関係を示す．A 群，B 群，C 群のそれぞれで，相関係数が 0.75 以上となり高相関がみられた．

指標の評価

指標化モデルを用いて，指標 $P_{Fi}(t)$ の生成を行い，観測値と比較する．はじめに，観測値を b_τ に基づいて 0，1，2，3 の 4 段階に分類し，指標と同じランクに当

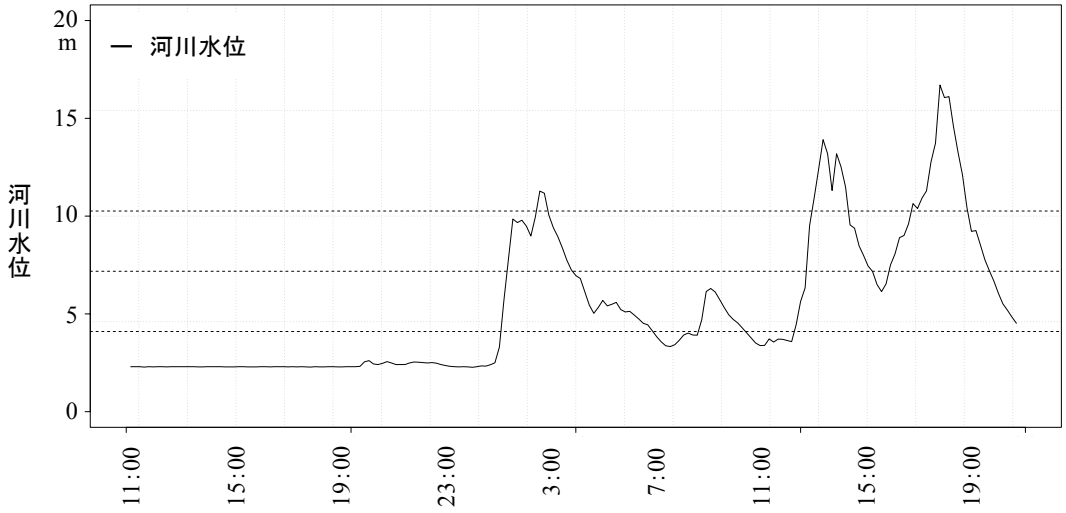
表 4.6 観測値と推定値の相関

	A 群	B 群	C 群
$\tau = 5$	0.80	0.81	0.76
$\tau = 10$	0.78	0.84	0.77

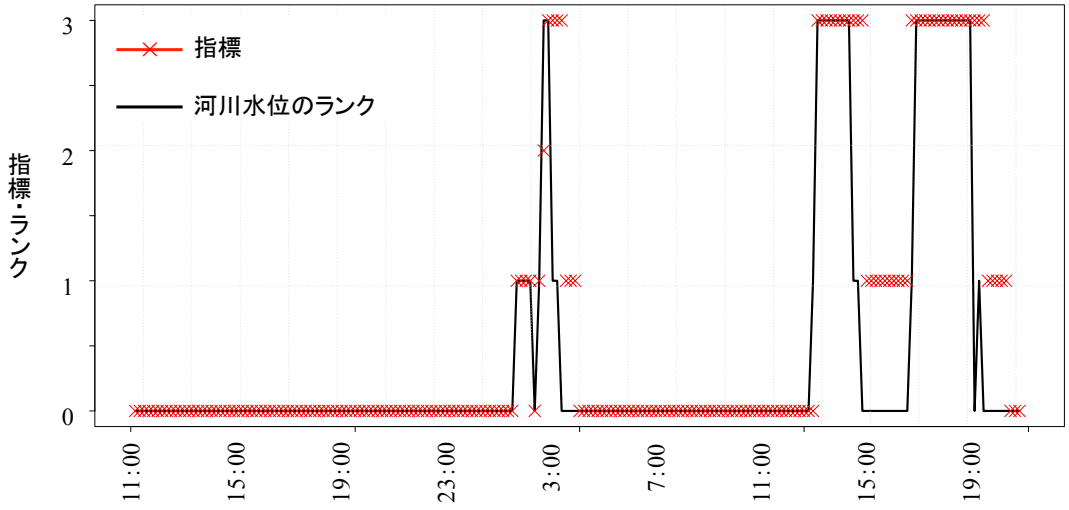
てはめた値とする．算出した指標と実測値である水位計の観測値との関係を述べる．豪雨の指標と同様に，最も積算降水量の多かった 2011 年 9 月 21 日について，観測値と指標の関係を評価する．地点 s_1，s_2 の観測値から生成した指標 $P_{Fi}(t)$ と地点 s_3 で観測された実測値から算出した指標 $P_{Fi}(t)$ の対応を図 4.13 に示す．

1:10 に水位の観測値が上昇し，同時に指標も上昇した．その後，2:10，12:20，16:00 に水位が上昇すると，指標は 3 の値を示した．その後，水位が下がると同時に，指標は下がり 1 の値を示した．図 4.12 に示す推定値ではこのとき 2 を示している．水位の変化に合わせて指標の値も変化している．しかし，浸水の指標も豪雨と同様に，観測値には完全な一致はみられず，観測値が低い際にも指標の算出が行われた時間があった．

指標の値の上昇は，水位の上昇と一致しているが，水位が下降した後も指標の値はしばらく高いまま保たれる．13:30 から 16:00 の間にみられるように，水位が下降した数分後に再び水位の観測値が上昇している．このような危険が継続する可能性があるとき，指標は一定の値に保たれ，水位の上昇とともに指標の値は大きくなった．水位の上昇が再び発生しない場合には指標の値は小さくなる．この指標の値の増減は，生成した指標は浸水の影響を示すために妥当であると考えられる．以上のことから対象とした日時において，観測点以外の地点での浸水の影響を示す指標と実測値との対応が確認できた．また，この指標は水位計，雨量計の 1 分値を用いており，用いた観測値の 1 分後に生成を行っている．



(a) 河川水位



(b) 指標の比較

図 4.13 観測値と浸水に関する指標の関係（浸水発生有無）

4.2.2 浸水に関する指標（浸水発生後）の評価

評価に用いた観測値

浸水に関する指標は，2013 年に福井県福井市で発生した内水氾濫の際に観測した浸水深の観測値をもとに評価する．観測値の収集にあたって，福井市内に浸水観測機器を構築した．ここでは，観測値が離れた箇所の 2 地点のみであるため，推定値の生成は行わず，観測点での指標とその周囲の地点での指標を生成する．

浸水観測機器

構築した浸水観測機器の構成を図 4.14 に示す．観測機器は観測装置と観測データサーバから構成され，浸水の観測と観測データサーバへの観測値の送信を行う．浸水の観測として，観測点にて河川や水路沿い，アンダーパスの画像を取得する．また，浸水水位や降水量のような付随する観測値の計測も併せて行う．観測値を受信した観測データサーバでは，観測値の加工と提供をする．観測には夜間に浸水が発生した場合であっても，観測が可能となるよう赤外線の Web カメラを用いている．カメラは，設置箇所にて堤防面付近，道路のような，浸水があった際の発生の有無，浸水水位の認識が可能である画像を撮影する．カメラで 1 分毎に撮影した画像をデータ蓄積サーバに格納し，3G 回線を利用してデータ蓄積サーバへ送信する．氾濫は市街地の中心部から離れた河川沿いで発生することもあり，浸水箇所にインターネットが整備されていない可能性も高い．そのため，インターネット回線が整備されていない地域であっても観測値の送受信が可能な構造とするため，3G 回線で構築した．

土地の高度と浸水の起こりやすさ

浸水の指標を生成するために，土地の高度を算出する．図 4.15 に，8 近傍ラプラシアンを用いて段階分けした高度を示す．この高度を数値によって，研究対象領域の高度を 0，1，2，3 の 4 段階に分類する．また，浸水の起こりやすさは内水氾濫のハザードマップから抽出を行う．ここでは浸水の起きやすさを，予想浸水

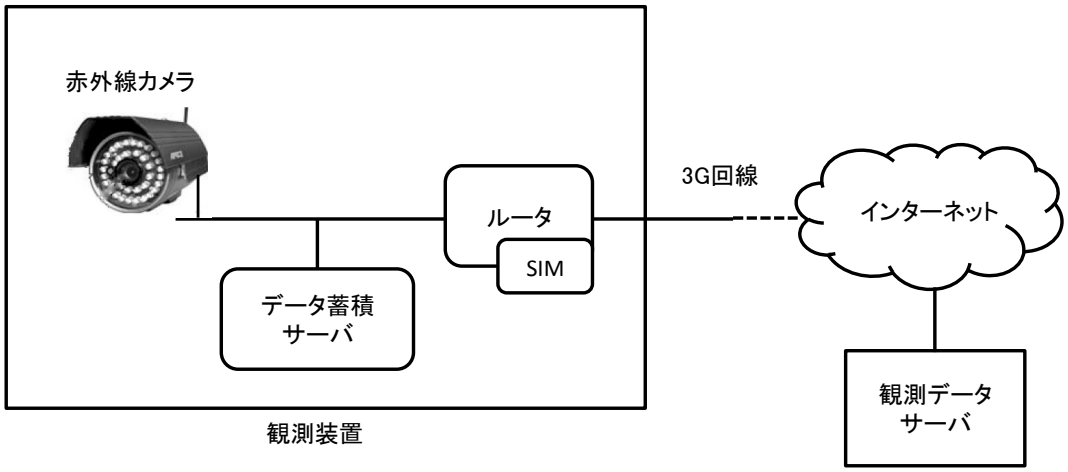


図 4.14 浸水観測機器の構成

深である浸水なし，0.5m 未満，0.5〜1.0m 未満，1.0m 以上と対応させ，それぞれ順に 0，1，2，3 と定める．

指標の評価

浸水に関する指標と観測した浸水の時系列との関係を図 4.16 に示す．浸水の指標に用いた観測値は中小河川や水路で観測された値であり，観測点が少ないため，推定値の生成はできない．そのため，観測点 l' での観測値をもとに，4 つのインディケータを組み合わせたときの，周辺での指標を生成し考察を行った．指標の生成は 4 種類行い，(a) 発生箇所での指標の生成，(b) 発生箇所から 50m 離れており標高差のない地点，(c) 標高の低い地点，(d) 標高の高い地点と分類した．なお，実際はなだらかな地形となっているため，標高差があるものと仮定して生成している．

(a) 発生箇所では，浸水深の上昇に伴って指標も上昇，下降した．浸水の発生有無を示す I_1，I_2 の 2 つのインディケータでは，実測値と良く対応していると考えられる．次に，浸水発生後について，I_1，I_2，I_3，I_4 の 4 つのインディケータを組み合わせた場合の指標を考える．まず，(b) の 50m 先の地点では，発生箇所と比較して一定時間後に指標が上昇している．また指標自体の大きさも発生箇所より

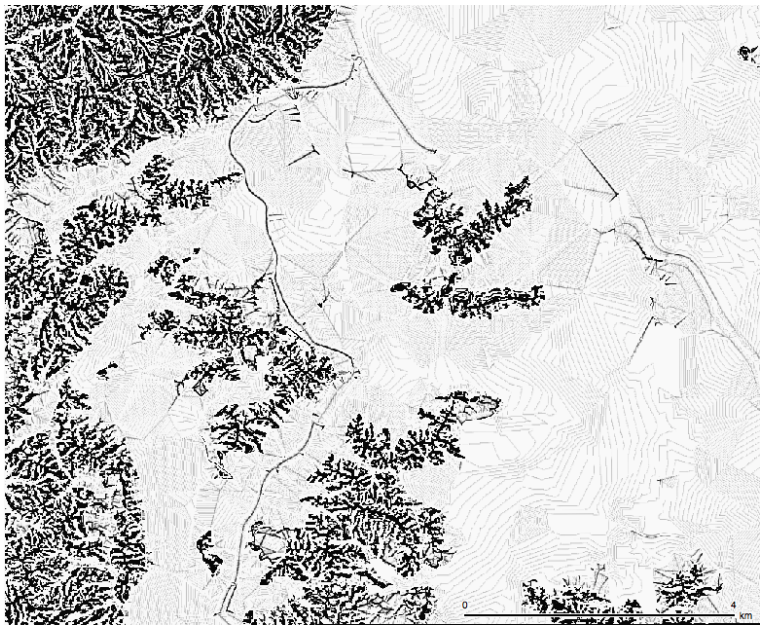


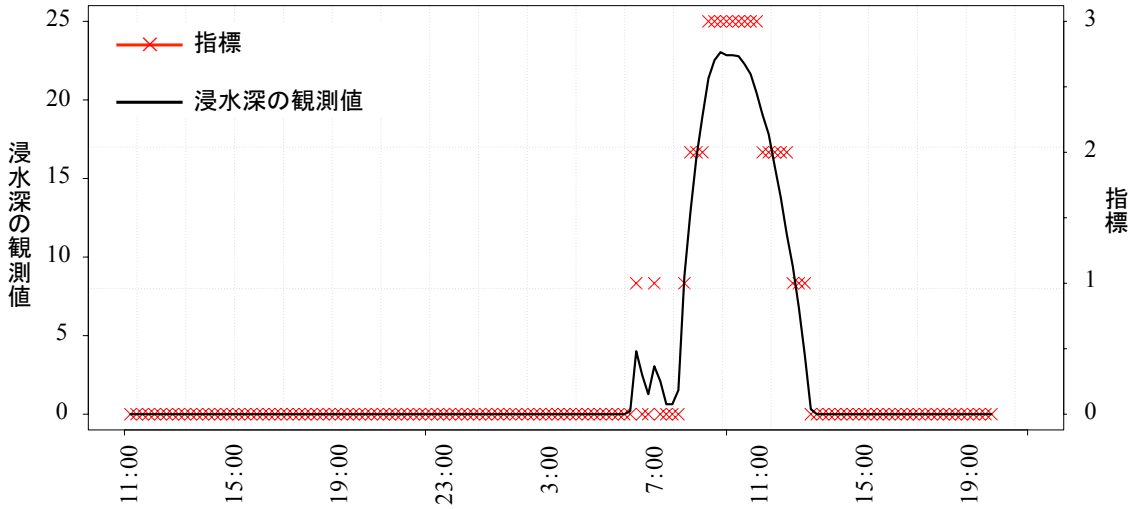
図 4.15 8 近傍ラプラシアンを用いて分類した土地の高度

低く算出される．これは発生箇所から距離がある場所では水が到達する時間差や，発生箇所より浸水深が低くなることを示している．(c) の標高の低い地点では，発生箇所とほぼ同じ時刻に指標が上昇している．これは発生箇所より低い地点では水が流出し，浸水が発生することを示している．最後に，(d) の標高の高い地点では，発生箇所で浸水が起きても指標は上昇しない．ただし浸水深が大きくなったときには，浸水となる可能性がある．これは発生箇所より高い地点では水が流れないため，浸水が発生しにくいことを示している．

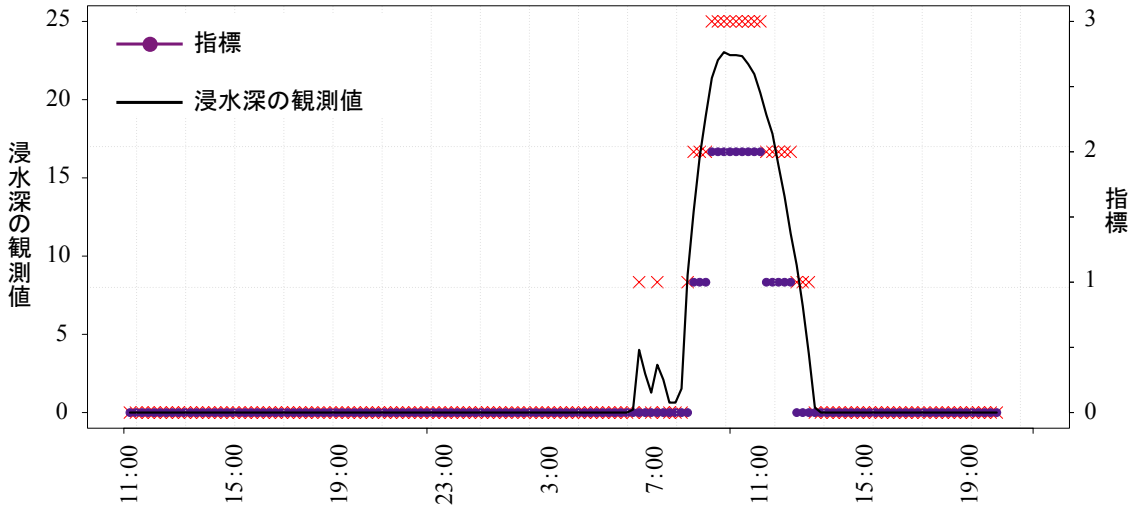
4.3. 指標化モデルの評価

4.3.1 豪雨に関する指標の妥当性

これまでの評価結果から，指標化モデルの妥当性を評価する．表 4.7 に $\tau = 10$（分）の際の，豪雨の指標と既存の観測値，指標との比較結果を示す．提案指標が，観測値以上の値となっていた割合は 99.9 %だった．そのうち，観測値と指標が一

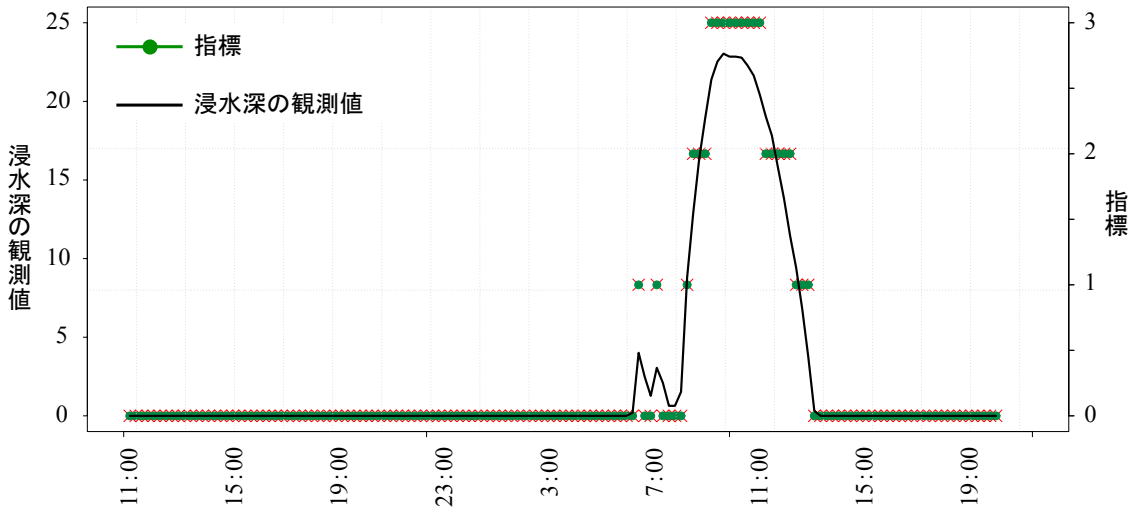


(a) 発生箇所

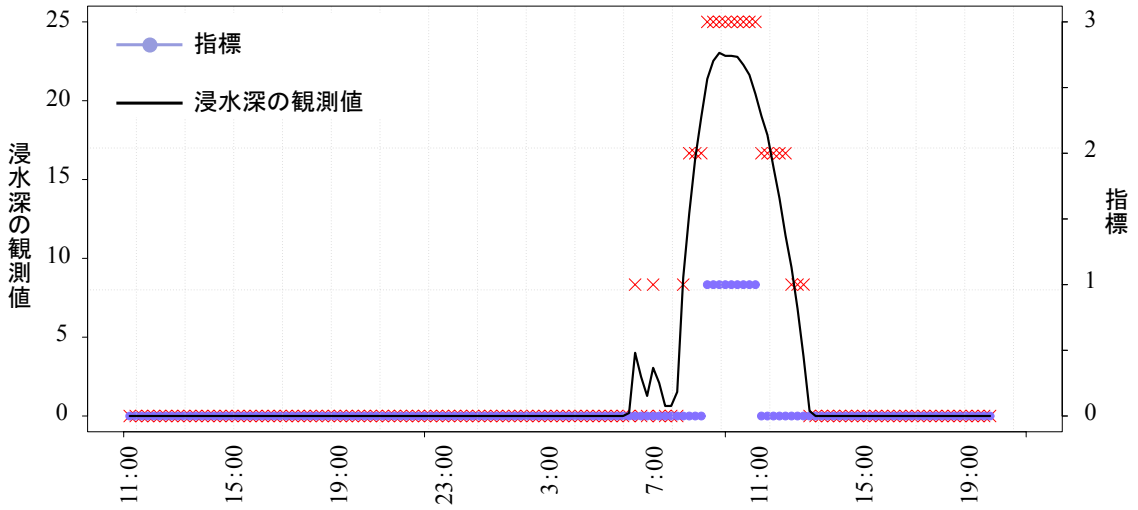


(b) 標高差なし

図 4.16 観測値と浸水に関する指標の関係（浸水発生後）



(c) 標高低



(d) 標高高

図 4.16 観測値と浸水に関する指標の関係（浸水発生後）（続き）

表 4.7 観測値と豪雨に関する指標の比較

項目	指標 ≥ 観測値（%）	差分（各項目-観測値）	危険の接近	危険の継続
提案指標	99.9	A:1.4,B:0,C:0.01	○	○
観測値のみ	100	0	×	×
従来指標：解析雨量，強雨検知	-	×	×	×
従来指標：強雨の危険	×	×	○	○
被災予測情報	×	×	○	○
I_2	98.0	A:0.04,B:-0.06,C:-0.02	×	×
I_1,I_3,I_4	99.6	A:0.26,B:0.00,C:-0.00	×	○
I_1,I_2,I_3	99.3	A:0.86,B:-0.06,C:-0.01	×	○

致した割合は，A 群では，65 %，B 群では 80 %，C 群では，降水量が低く指標がすべて 0 として生成されたため，すべての指標が一致した．

次に，提案指標と既存の観測値，指標を比較する．提案指標が，観測値以上の値となっていた割合は 99.9 %だった．そのうち，65〜80 %程度が過検知となっていた．ただし，多めの推定ではあるものの，提案指標では危険の接近，継続の判別が可能となる．一方で，既存の観測値のみの場合は，現況はわかるが危険の接近，継続の判別を行うことはできない．また，観測値からは観測機器の設置されている地点の現況のみしか知ることができない．既存の指標として，解析雨量による推定や，強雨を検知し，その危険を情報提供するサービスがある．解析雨量は空白域での降水量の推定値を示し，強雨の検知は現況の降雨状況を示すが，危険の接近，継続を示す指標とはなっていない．強雨を検知するサービスは危険の接近，継続を示すが，現況を示す指標ではない．被災予測情報である警報・注意報は危険の接近，継続を大まかに示すことは可能であるが，対象地点の現況を示すことができない．以上のことから，提案指標は，現況，危険の接近，継続の観

点から，既存の観測値，指標より優れていると考える．

さらに，指標化モデルを構成する I_1，I_2，I_3，I_4 の 4 つのインディケータが，豪雨の影響を示す要因として十分であるかを検討した．指標を構成するインディケータの組み合わせを変更し，観測値と比較した．組み合わせは 3 通りとし，1 つめが I_2 のみ，2 つめが I_1，I_3，I_4 の場合，3 つめが I_1，I_2，I_3 の場合とした．観測値との比較の結果，算出した値が観測値以上となっていた割合は 98〜99 %程度であり，提案指標とほとんど変わらなかった．ただし提案指標では，過検知の割合が多く，危険となる可能性を大きめに推定する傾向にあり，過検知となる値の差分が大きく算出される場合がある．しかし，インディケータの構成を変化させると，差分がマイナスとなり，実際の観測値より低く指標が生成される．I_2 のみのときは，A 群，B 群，C 群のすべてで，差分がマイナスの値をとり，指標が小さく生成された．さらに，I_1，I_3，I_4 と，I_1，I_2，I_3 の組み合わせでも，指標の値が小さく生成される場合があった．このように差分がマイナスとなり実際より小さく推定されるうえ，インディケータの組み合わせを減らすと，危険の接近や継続を示すことができなくなる．そのため，観測値より大きめの値として，危険の接近，継続を示すことができる提案指標が，豪雨の影響を示すために優れていると考える．

4.3.2 浸水に関する指標の妥当性

浸水に関する指標の妥当性を評価する．表 4.8 に $\tau = 10$（分）の際の，浸水の指標と既存の観測値，指標との比較結果を示す．提案指標が，観測値以上の値となっていた割合は 100 %だった．そのうち，A 群，B 群，C 群ともに 74 %以上の割合で値が一致している．提案指標と既存の観測値，指標を比較する．浸水の指標では，提案指標が観測値以上の値となっていた割合は 100 %となり，すべての時間で大きく推定することが可能であった．そのうち，平均してそのうち，82 %が一致しており，18 %が過検知となっていた．つまり提案指標では，実測値と比較し大きく推定されるものの，危険の接近，継続の判別が可能となる．観測値のみの場合は，現況はわかるが危険の接近，継続の判別が難しいうえ，観測点のみの現況しか示していない．既存の指標として，流域雨量指数や浸水想定がある．これらの指標は現況の浸水の起こりやすさや浸水深を示すが，危険の接近，継続を示

表 4.8 観測値と浸水に関する指標の比較

項目	指標 ≥ 観測値（%）	差分（各項目-観測値）	危険の接近	危険の継続
提案指標	100	A:0.23,B:0,C:0.37	○	○
観測値のみ	100	0	×	×
従来指標	-	×	×	×
被災予測情報	×	×	○	○
I_2	100	A:0.23,B:0,C:0.16	×	×

す指標とはなっていない．また，被災予測情報である警報・注意報は危険の接近，継続を大まかに示すことは可能であるが，対象地点の現況を示すことができない．

以上のことから，提案指標は現況，危険の接近，継続の観点から既存の観測値，指標より優れていると考える．さらに，指標化モデルを構成する I_1 から I_4 のインディケータが，豪雨の影響を示す要因として十分であるかを検討した．指標を構成するインディケータ I_2 のみであるとして，観測値と比較した．観測値との比較の結果，算出した値が観測値以上となっていた割合は 100 %であり，提案指標と変わらなかった．また，過検知となる値の差分も同程度となった．しかし，豪雨の指標と同様に，この浸水の指標もインディケータを構成する要因を減らすと，危険の接近や継続を示すことができなくなる．また I_3，I_4 のインディケータがある場合とない場合を考えると，河川から離れた地点では時系列の観測値が存在しないため，評価を行うことは難しい．ただし，I_3，I_4 が存在することによって，河川の付近だけではなく，河川から離れた地点での浸水の影響のしやすさを示すことが可能となる．I_3，I_4 を使った指標では，過去に浸水の影響を受けた地点での浸水深と近い指標を算出している．そのため，危険の接近，継続を示し，河川から離れた地点での浸水を推定できる提案指標が，浸水の影響を示すために優れていると考える．

4.4. 指標の生成と認識に対する検証

4.4.1 防災教育の実施

防災教育の目的

豪雨に関する指標を活用して，短時間強雨に対する防災対応能力を高めるための防災教育を実施する．ここで目的とする防災教育とは，対象者自身が提供される数値情報を理解して，発生する降雨状況と危険を予想し，身を守る行動をとれるようにすることを指す．本研究で目指す防災教育のイメージを図 4.17 に示す．観測値は，実際の豪雨の発生箇所や発生タイミングが異なる．対象地点の豪雨の状況を降雨情報として提供することで，降雨情報の示す数値の意味を正しく認識し，短時間強雨の及ぼす影響や危険を予想する訓練を行う．そのため，降雨の状況を適切に表現した降雨情報の生成，生成した降雨情報を利用して降雨の状況を理解する防災教育の実施，対象者の降雨情報の認識能力を上げることが必要となる．降雨情報として，豪雨に関する指標のうち，指標の生成に用いた降水量の推定値を用いる．

本研究における防災教育は，都市域の高校に通学している高校生を対象として，授業中，通学中における防災意識の向上を目的とする．高校生は授業中，通学中においてテレビ，ラジオ等，災害情報の提供を詳細に行うツールの使用ができず，判断がしやすい情報を入手する手段を持たない．一方で携帯電話，スマートフォンはほとんどの高校生が所持しており，通学中に使用することが可能な状況にある [85] [86]．さらに高校生は災害に対する被災経験も少ないため，大人に比べて危険の判断が難しい．短時間強雨の発生は 17〜23 時頃に集中すると考えられているため，学校から自宅への帰宅等，学校を中心として行動する状況を想定している．特に，高校生は他の年代の学生と比較し通学時間が長いことから学校外での通学距離が長く，被害に遭う可能性が高いため，対象と定めた [87]．

防災教育の手法

実施する防災教育の手法を図 4.18 に示す．防災教育は，情報提供から豪雨の影響を予想するまで，A. 降雨情報の内容把握，B. 降雨の体験，C. 降雨情報と体験の

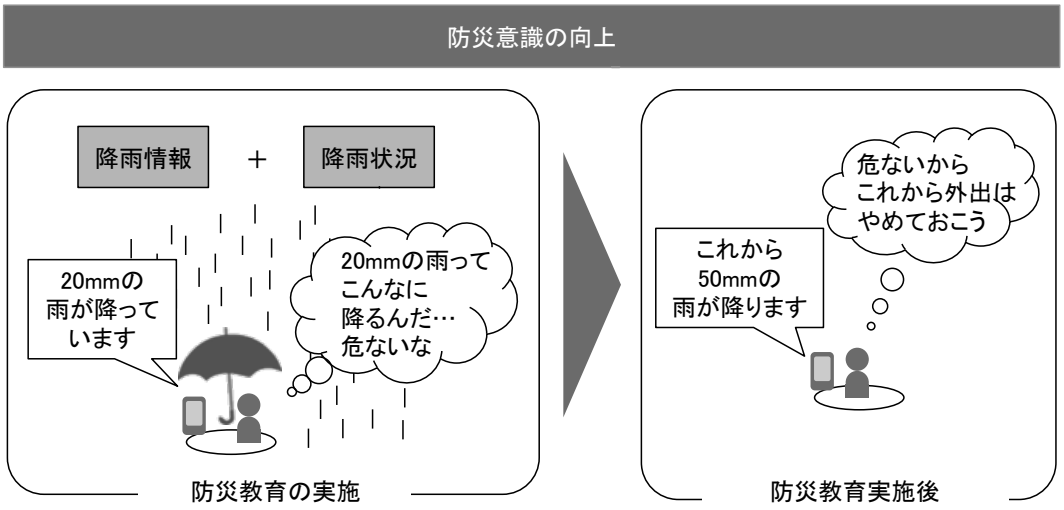


図 4.17 目的とする防災教育

比較の 3 つの教育項目によって実施する．はじめに降雨情報が提示され，高校生は A. 降雨情報の内容を把握する．降雨情報を把握したうえで次に実際に起きている B. 降雨の体験が行われる．C. 降雨情報と行った体験を比較することで，降雨状況と降雨情報との適切な組み合わせの理解が可能となる．ここで，適切な理解ができているか高校生の認識を確認することで，認識能力の向上を確認する．さらにここまでの 3 つの教育項目を繰り返し実施するためには，高校生が降雨情報や降雨状況に対する興味を持てるように D. 興味の喚起が重要となる．図 4.18 に示す教育項目を繰り返し実施することで，高校生が降雨情報と降雨状況をあわせて理解でき，降雨情報の認識能力が向上すると考える．

4.4.2 降雨情報の提供による認識の変化

高校生の短時間強雨に対する意識

高校生の短時間強雨に対する意識を調査する．調査対象は，短時間強雨の発生が多い都市域の高校生に対して，多段抽出法を用いて無作為抽出した．ただし短時間強雨にあった経験のない高校生のみを対象としている．聞き取りは，以下の 2 点について高校第 1 学年の男女 22 名を対象とし質問紙を用いた集団調査で行った．

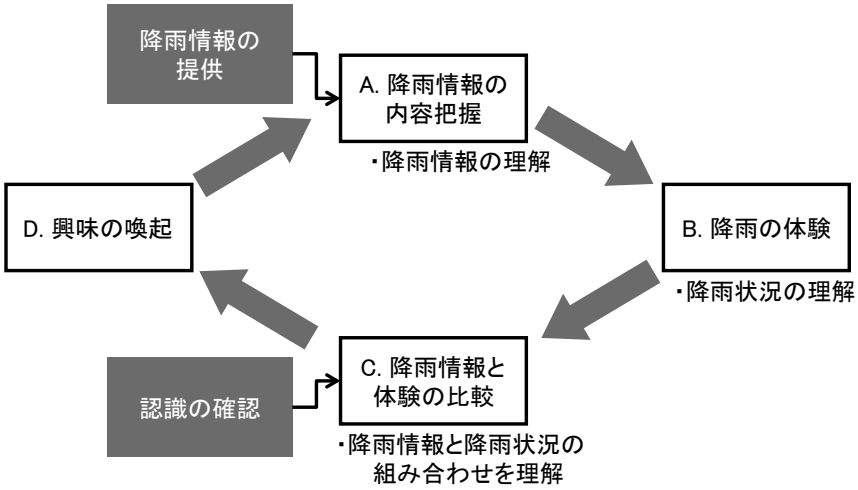


図 4.18 防災教育の教育項目

- 降雨状況から危険を予想できるか
- 数値情報から降雨状況を認識し，危険を予想できるか

はじめに，降雨情報として数値情報と降雨状況の説明を高校生に提示する．次に危険を予想させるための質問を行い，自由記述式にて文字制限なしの文字列を用いて回答させた．聞き取りで使用した降雨状況の説明を表 4.9 に示す．この聞き取りで用いた数値情報として，指標の生成に用いた対象地点の降水量の推定値を使用する．また降雨状況の説明として，気象庁が定める雨の強さと降り方に対して，人が受けるイメージや過去の台風の観測値，降雨の状況を撮影した写真を使用している．降雨の状況を撮影した写真として，図 4.19 に示す 2011 年 8 月 26 日に発生した短時間強雨の様子を使用した．

質問と回答の例を図 4.20 に示す．聞き取りの結果,「ザアザアの雨」,「台風のときのような雨」等，降雨状況を説明した言葉を用いた質問や道路が冠水している写真を見せながらの質問では，危険の予想が行いやすく，降水量に見合った影響が回答として得られた．ただし交通機関への影響等の事例の予想は可能であったが，地下施設の浸水，道路の冠水やマンホールの蓋が外れる等，高校生自らが帰宅中に被害を受ける可能性のある危険についての回答は見られなかった．一方で，同

表 4.9 高校生に提示した数値情報と降雨状況の説明

数値情報（降水量）	降雨状況の説明
10mm/h 未満	しとしとの雨
10〜20mm/h	ザアザアの雨
20〜30mm/h	台風のときのような雨
30〜50mm/h	(写真の提示)
50〜100mm/h	(写真の提示)

じ質問を「50mm/h の雨」,「100mm/h の雨」という言葉に置き換えたところ，ほとんどの生徒が影響の程度を低く見積もった．

以上のことから，降雨状況を目にしたときや認識したときは，ある程度の危険の予想が可能であるとわかった．しかし，数値情報の提示では，降雨状況を予想することができず，危険の予想は難しいと考えられる．一方，気象庁や多くの情報提供機関が行う従来の情報提供は数値情報を利用している．そのため，本研究で行う降雨状況と数値の正しい理解と，降雨状況の予想を訓練し，予想した降雨状況から，起こりうる危険を想像させる必要性があると考えられる．

高校生に提示する降雨情報とタイミング

提示する降雨情報とタイミングを表 4.10 に示す．提示する降雨情報は降水量の推定値のほか，降雨の極大値，積算の降水量とした．これらの降雨情報を提示するタイミングは降雨の開始時，終了時及び降水量のピーク時とした．降雨の開始時の情報提示は降雨状況の予想，短時間強雨のピーク時には降水量やその極大値と周囲で発生している降雨状況を比較し，危険を予想することを目的としている．降雨の終了後には，提示される積算の降水量から降雨状況と降雨情報の関係を理解させる．なお，短時間強雨が発生する可能性のある時間帯が夕方から夜間にかけてであることから，下校前，帰宅中の状況を想定した．そのため，下校前，帰宅中の状況で高校生が情報を得ることができる手段として，携帯電話，スマートフォンを使用することとした．



図 4.19 聞き取り時に用いた写真の例

4.4.3 防災教育の試行結果と課題

防災教育の試行内容

本研究の防災教育で，降雨情報の認識能力が高まるか試行する．試行は，図 4.18 に示した A. 降雨情報の内容把握，B. 降雨の体験，C. 降雨情報と体験の比較のそれぞれの教育項目を確認することで行う．各教育項目について，図 4.18 に示す A. 降雨情報の内容把握については与えられた降雨情報の理解，B. 降雨の体験につい

表 4.10 高校生に提示する情報とタイミング

提示するタイミング	降雨情報の内容	防災教育のねらい
降雨の開始	降水量	-
極大値に達する前後	降水量，降水量の極大値	危険の予想， 降雨状況と降雨情報の理解
降雨終了後	積算の降水量	降雨状況と降雨情報の理解

質問と回答例 1

「現象から危険を予想する」
【質問】
台風のときのように
雨が降ったら
どのような影響があるか？
【回答例】
・河があふれる
・土砂崩れが起きる
・交通がストップする
・その辺に壊れた傘が
落ちていて危ない

質問と回答例 2

「情報から現象を認識し，危険を予想する」
【質問】
50mm/h の雨はどのような現象が起きるか？
どのような影響があるか？
【回答例】
現象
・靴が濡れる
・水たまりが多くできる
影響
・よくわからない
・閑散としている
・河が氾濫する

図 4.20 聞き取りの質問，回答例

ては降雨状況の理解として，降雨情報を理解し，降雨状況として表現できるかを確認する．C. 降雨情報と体験の比較については，降雨状況を理解し，与えられた降雨情報と適切に組み合わせることができるかを確認する．

防災教育の試行手順

4.4.2 項で意識調査を行った高校生のうち，21 名を被験者として防災教育を試行する．学校で短時間強雨に遭遇した状況を想定し，降雨の様子を撮影した写真の提示を，降雨の体験と代替した．このとき使用した降雨情報は，提示する写真を撮影した際に生成した対象地点の降水量の推定値とした．以下に示す手順を同じ被験者に対し実施し，図 4.18 に示す教育項目を 2 巡行う．想定する短時間強雨は 50mm/h，100mm/h の 2 つである．50mm/h の際の情報提示が図 4.18 に示す防災教育の教育サイクルの 1 巡目となり，100mm/h の際が教育サイクルの 2 巡目にあたる．記述式の質問紙にて自由回答形式で教育項目を確認した．なお，図 4.18 に示す教育項目 D. 興味の喚起については高校生が自主的に 4 つの教育項目を繰り返すための項目であるため，本試行では確認の対象としない．

事前測定

はじめに防災教育を行っていない状態で，被験者が持つ降雨情報の認識能力を測定した．被験者に対し，80mm/h の短時間強雨が発生した際の写真を提示し，写真が示す降雨が50mm/h，80mm/h，100mm/h のどの数値情報に該当するか答えさせた．ただし，被験者の学習を防ぐため，正答は伝えずに事前測定を終え，次に示す手順 1 を実施した．

手順 1：教育項目 A. 降雨情報の内容把握の実施

被験者に対し，降雨情報の提示を行った．具体的には，短時間強雨のピーク時に極大値として,「これから○ mm/h の雨が降ってくる」という降雨情報を与えた．提示した降雨情報は，過去に観測した短時間強雨の際に生成され得られた対象地点の推定値である．

手順 2：教育項目 B. 降雨の体験の実施

手順 1 で被験者に提示した降雨情報を示す写真の提示を行った．この写真は，提示した降雨情報が手順 1 で示した数値となっていた際に，高校付近で撮影した降雨状況である．写真を見せることにより短時間強雨の降雨状況を体験しているものと仮定した．

手順 3：教育項目 A と B の確認

被験者に対し，降雨の数値情報を与え，数値情報から降雨状況を適切に表現できるか確認した．降雨状況の表現として，該当の降雨情報についてどのような音がするか，地面の状態はどのようになるか，周囲の様子はどのようになるかの 3 点について自由回答させた．それぞれの表現の基準は，提示した降水量に近い表現を正答とした．例えば，50mm/h の写真を提示した際に，音を「ゴーゴー」，地面の状態を「道路に川が出来る」，周囲の様子を「まわりが見えなくなる」という言葉で表現していた場合，正答とした．また，手順 3 を終えた時点で被験者に対し正答は与えていない．

手順 4：教育項目 C の確認

降雨状況と与えられた数値情報を適切に組み合わせられるか，確認を行った．被験者に対し，短時間強雨の写真を提示し，写真で示

表 4.11 教育項目 A と B で正しく表現できた被験者数（N=21 人）

	音	地面の状態	周囲の様子
1 巡目：手順 3	13	6	6
2 巡目：手順 3	14	9	12

表 4.12 教育項目 C で正しく回答できた被験者数（N=21 人）

	正答者数
事前測定	5
1 巡目：手順 4	6
2 巡目：手順 4	13

される降雨の状況が何 mm/h の数値情報であるか答えさせた．高校生の回答後，写真の降雨状況が示す正しい数値情報を教えた．

防災教育の試行結果

事前測定の結果，試行前に正しい数値情報との組み合わせを回答できた被験者数は 21 名中，5 名であった．手順 1 の教育項目 A と手順 2 の教育項目 B の実施後，手順 3 で得られた 50mm/h のそれぞれの降雨状況について正しく表現できた被験者数と 100mm/h のそれぞれの降雨状況について正しく表現できた被験者数とを表 4.11 に示す．正しく答えられなかった回答として，50mm/h の場合を例に挙げると，音については「ボタボタ」，地面の状態については「水たまりが少しできる」，周囲の様子については「雨が跳ねて濡れる」という表現で，実際の降雨状況より小さく認識する傾向がみられた．事前測定の結果，手順 4 について適切な組み合わせを回答できた被験者数を表 4.12 に示す．

防災教育の考察

表 4.11 より，1 巡目と 2 巡目を比較すると音，地面の状態，周囲の様子のすべてにおいて適切に回答できた被験者数の増加がみられた．これは 1 巡目で手順 1，2，3 を実施したことによって，被験者がもともと持っていた数値情報と降雨状況の認識の差が縮まり，2 巡目では適切な表現で回答を行う被験者数が増加したものと考えられる．音のみ，回答できた被験者の 増加数が少ない理由として，降雨状況を体験する代替として写真の提示が挙げられる．写真を提示したことにより，被験者は降雨のイメージがしやすく 1 巡目の段階から適切な回答ができたものと考えられる．

さらに，表 4.12 で，防災教育実施前と 1 巡目の結果を比較すると，1 巡目の方が正答者数が増加し，2 巡目では 2 倍以上の被験者が正答した．これも表 4.11 の表現の場合と同様に，1 巡目で手順 1，2，3 を実施して図 4.18 に示した教育項目を行うことで，被験者の降雨情報に対する情報認識能力が向上し，2 巡目では適切な回答を行った被験者数が倍増したと考えられる．これは教育項目 A，B を実施し，降雨情報と降雨状況についての理解が深まったことから，結果として教育項目 C に示した降雨情報と降雨状況の適切な組み合わせがわかるようになったと考えられる．

以上のことから，本研究で提案する防災教育を実施することで，降雨情報を適切に認識できるようになった被験者数が増加したとわかった．提案する降雨状況にあわせた降雨情報の提示が，降雨情報の認識能力を高める防災教育に有効だという可能性があることを示した．

4.5. 生成した指標の提供手法の検討

4.5.1 被災地域への情報提供

生成した指標を提供するための手法について検討する．指標を活用した被害軽減を実現するには，被災地域の人々への確実な情報提供が重要である．しかし，実際の豪雨や浸水の発生時には，情報提供環境に情報提供の遅延が発生し，利用できる受信機器に制限が出てしまい，迅速な情報提供が困難となる．また，従来の

災害情報は，広範囲に対し一律な情報が提供されている．本研究の指標化モデルは，対象地点の被災状況にあわせた情報生成を可能にした．この指標を被災地域の人々へ確実に提供するためには，遅延が発生した状況下での情報入手や，被災地域の状況を把握し，その時空間にあわせた情報提供が必要となる．

4.5.2 災害情報の提供における問題

情報の遅延

気象庁，河川管理機関，自治体等の複数の防災組織が，降雨や河川の状況把握と，状況に合った適切な災害情報の生成を行っている．迅速かつ確実に情報提供を行うためには，複数の防災組織での情報共有や，状況に即した災害情報の生成と提供が重要となる．しかし，豪雨や浸水が発生するような切迫した状況下で，迅速な情報提供の確実な実施は容易でない．遅延の原因として，各防災組織がそれぞれ独自の観測網や情報システムを保有していることが挙げられる．各防災組織の観測網や情報システムは，情報形式が異なっており，互いの連携していない．そのため情報を共有することが難しく，組織間に跨がった災害情報を生成するための処理に多くの時間を必要とする．このような情報形式の差が，迅速な情報提供を阻害する要因となっている．

従来の情報提供環境を用いて指標を提供する際の遅延について述べる．研究対象領域 D における任意の位置座標 s において，観測が時刻 t_p，指標の生成が時刻 t_{p+n} に行われる．情報提供時に生じる遅延のため，実際に被災地域の人々が情報を入手する時刻は $t_{p+n} + t'$ となる．ここで t' は情報提供の遅延時間であり，観測網や情報システムの情報形式の違いに起因する．t' は，その値が大きいほど，迅速な情報提供が行いにくくなる．そのため，豪雨と浸水の発生と対象地点での指標の生成にあわせた情報提供タイミングの制御が必要となる．

発生箇所と情報提供範囲のずれ

次に従来の情報提供環境を用いて指標を提供する際の提供範囲について述べる．本研究の指標は，$s = [lon, lan] \in D$ となる対象地点 s_i ごとに生成される．しかし，

受信機器ごとに情報の提供範囲は様々である．そのため指標が示す s_i での被災状況は，情報提供範囲の被災状況を示しているとは限らない．つまり，指標が示す地点と情報の提供範囲にずれが生じると考えられる．そのため，受信機器の特性に合わせて情報提供範囲を制御する必要がある．

4.5.3 情報共通インタフェース

情報提供タイミングの制御

迅速かつ確実に指標を提供するための，情報共通インタフェースを提案し必要な機能を考察する．本インタフェースは，豪雨と浸水の状況にあわせた情報提供タイミングと受信機器の特性にあわせた情報提供範囲の制御を行い，情報提供時に生じる時刻と範囲のずれを補正する．活用する受信機器として，インターネットを経由した文字による提供（テレビの L 字放送，Web への掲載，PC のメール，携帯電話のメール）を用いる．

情報共通インタフェースを用いた情報提供タイミングの制御を図 4.21 に示す．情報提供タイミングを制御するため，情報形式の自律的な変換と複数の受信機器への同報の 2 つの手法を用いる．本研究では，はじめに各防災組織の観測網や情報システムの情報形式を，統一の情報形式である共通情報形式へ変換する．災害情報を共通的に扱うための共通情報形式として様々な情報形式が存在する．代表的な共通情報形式として，Common Alerting Protocol，気象庁防災情報 XML，公共情報コモンズフォーマットが挙げられる [88] [89] [90]．次に，共通情報形式を受信機器に合った情報形式に変換し，複数の異なる受信機器へ提供可能とし，一括して提供することで同報配信を行う．

はじめに，提案する情報共通インタフェースが持つ情報形式の自律的な変換する機能について述べる．各防災組織に既設の観測網や情報システムの情報形式を，統一した情報形式へ変換し，システム間の情報流通を実現する．また，統一した情報形式を，それぞれの受信機器の情報形式へ変換する．本インタフェースが情報形式を自律的に変換することで，各システムが同一の情報を扱えるようになり，従来の情報提供環境で情報の変換を行うために必要であった処理工程や処理時間

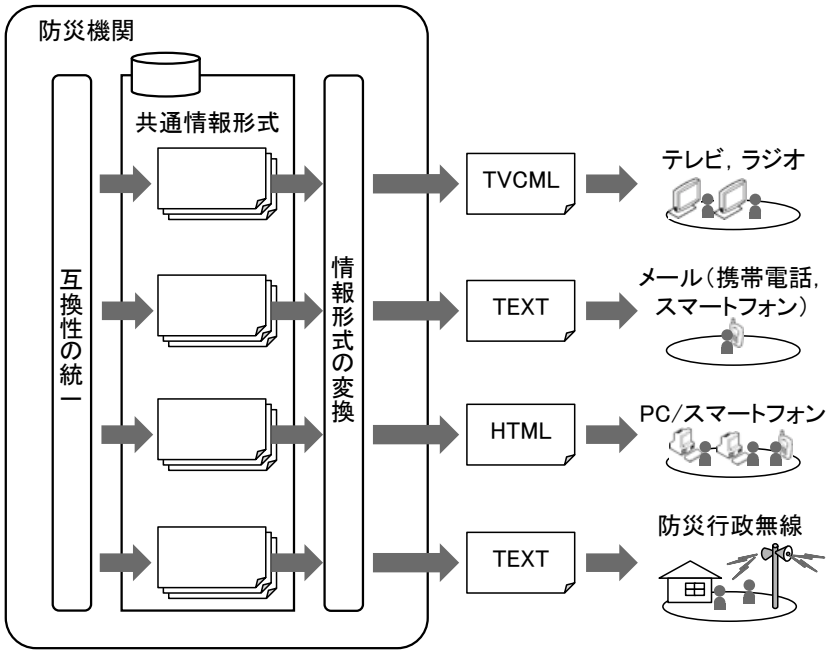


図 4.21 情報共通インタフェースによる情報提供タイミングの制御

が削減される．そのため，情報形式の自律的な変換によって従来生じていた遅延時間 t' が低減でき，発生タイミングにあわせた指標の提供が可能となる．

次に，情報の提供先である受信機器へ，指標を同報配信する機能について述べる．システム間の情報流通を実現することで，各防災組織に既設の観測網や情報システムを活用して，複数の受信機器へ向けて，指標を同報配信できる．本インタフェースで指標の情報形式を受信機器に合わせて自律的に変換し，複数の受信機器に対し，一括して情報提供する．本研究で活用する受信機器と情報提供先の情報形式を，表 4.13 に示す．受信機器の情報形式は，主に TVCML，XML，TEXT，HTML が使用されている．そのため，指標をこれらの情報形式へ変換し，同報を実現することとする．同報配信によって，従来必要であった各受信機器に向けて情報提供を行う処理工程や処理時間が削減され，遅延時間 t' の低減が期待できる．

表 4.13 選定した受信機器と情報形式

受信機器	情報形式
テレビの L 字放送	TVCML，XML
PC のメール，携帯電話のメール	TEXT
Web への掲載	HTML
その他（デジタル防災行政無線等）	TEXT

情報提供範囲の制御

情報提供範囲の制御を実現するため，情報提供範囲に合わせて指標を選定し，範囲の違いによるずれを解消する．受信機器ごとに指標の提供範囲を定め，その提供範囲のうち，豪雨や浸水の状況を最も代表する指標の選定を行う．

情報提供範囲の制御するための指標の代表値の選定手法について述べる．はじめに，研究対象領域 D において指標の示す地点は，位置座標上の対象地点 s_i で示される．次に位置座標を格子状に分割する．s_i を中心とする長さ δx_{ij}，δy_{ij} の任意の格子を H_{xyij} と示す．受信機器 A の提供範囲について格子を用いて

$$A_{xyij} = \sigma H_{xyij}(xyij = 1, \cdots, n) \tag{4.1}$$

と表現する．このうち A_{xyij} に含まれる点 s_i の中で提供範囲を代表する値を受信機器 A で提供する指標とする．正確な指標の提供を行うためには，正確な代表値を選定することが必要となる．豪雨の指標では，中央値もしくは最頻値，浸水の指標では最大値を代表値として選定する．代表値を選定することで受信機器に応じた提供範囲の制御が実現すると期待できる．

4.5.4 情報提供タイミングの比較

提案する情報共通インタフェースの機能のうち，情報提供タイミングを制御として，情報形式の自律的な変換と同報配信の効果について検討する．検討は，1 つの自治体を例にとり，情報共通インタフェースを試作し，指標の提供にかかる時間を考察することで行った．対象の自治体で使用している情報提供環境を用いて，

従来の情報提供に必要な時間を算出したところ，情報の提供を決定してから実際の提供までにかかる時間はひとつの受信機器につき最短 7 分となった．この内訳は，提供する指標の生成にかかる各 2〜10 分，報道機関への情報提供に 5 分以上，その他の受信機器への情報提供に 5〜30 分となっている．情報を提供する受信機器の数が増えるほど，多くの情報提供時間が必要となる．そのため従来の情報提供環境では，表 4.13 に示した 5 種類の受信機器に情報提供を行うと最短 35 分かかる．情報共通インタフェースで 5 種類の受信機器に対して同報を行うと，指標の生成，情報提供にかかった通信時間は，1 分以下となる．ただし，テレビやラジオ，防災行政無線への情報提供は，該当の情報形式への変換にかかった時間を用いた．

4.6. 評価の結論

本研究では既存の観測値，指標の空間的，時間的ずれを解決し，豪雨と浸水の影響を指標化するため，時空間分布の推定を行った．豪雨と浸水の指標はそれぞれ 4 つのインディケータから構成される．各インディケータを生成し，観測値との相関を求めたところ，降水量の推定値，河川水位の推定値で高い相関が確認できた．また，近傍の降水量については観測値とやや高い相関を確認した．

観測点によっては，個々のインディケータでは推定の精度は低くなる可能性がある．しかし，各インディケータをそのまま用いるのではなく，指標として組み合わせて用いることで，実測値に近似した指標を生成することができた．さらに観測値だけではわからなかった，影響が及ぶ可能性や継続の可能性がある際も指標は大きな値を示す．そのため，本研究の指標化モデルで生成した指標は豪雨と浸水の影響を推定する値として妥当性があることがわかった．

本研究の指標生成に用いた推定値を活用して，数校の高校で危険回避行動に関わる防災教育を実施し，豪雨と浸水の危険の認識可能性について調査した．その結果，継続的な提示によって豪雨についての認識が高まる可能性があることがわかった．さらに生成した指標を，被災地域の人々に情報提供するための検討を行い，提供タイミングの制御による遅延の改善と，豪雨と浸水の発生規模に応じた提供範囲の制御が必要であり，情報共通インタフェースの構築によってその制御が可能となるとわかった．

以上のことから，指標化モデルによって，高い確率で豪雨と浸水の影響として，現況，周囲の状況（危険の接近，継続）を推定することが可能となる．本研究は，従来存在しなかった豪雨と浸水の影響を示す指標を提案し，実際の観測値を用いてその妥当性を示した．

第5章
結　　論

5.1. 本研究の成果

本研究は，頻発する豪雨と浸水の被害軽減を目指し，豪雨と浸水の時空間分布を推定するための指標を生成する指標化モデルを提案した．本研究の指標とは，豪雨と浸水の現況，その影響による周囲の状況（危険の接近，継続）を示す値とする．既存の観測値，指標は，時間的，空間的なずれにより，発生タイミングや発生箇所に差異が生じている．そのため，既存の観測値，指標をもとにした被災状況の把握が難しかった．そこで，本研究では，観測値を活用して豪雨と浸水の推定を行う指標化モデルを提案した．はじめに，観測機器の未設置地点における降水量や浸水深の推定値を算出した．複数の観測機器から得られる観測値を線形近似し，未設置地点の推定値とした．算出した推定値から観測点以外の降雨や河川，浸水の状況を知ることができる．次に，豪雨と浸水に影響を与える要因を離散化した．豪雨では降水量の変化，近傍の降水量，豪雨の要因となる上空，周囲の積乱雲の変化を要因とした．また，浸水では，河川水位や浸水深の変化，近隣の降水変化，土地の高度，浸水の起こりやすさを要因とした．離散化したそれぞれの値の組み合わせによって，指標の生成を行った．指標と観測値を比較し，指標が目的とする豪雨と浸水の現況，その影響による周囲の状況（危険の接近，継続）を表す妥当な値であると示した．

降雨が人や社会に及ぼす影響を指標とする研究は既に数多く行われている．また，地震災害や火山災害のように他の災害による社会への影響も，震度や噴火警戒レベルとして指標化されている．しかし，豪雨と浸水は位置や時間の違いによってその影響が大きく異なるが，これまで豪雨と浸水の影響の時空間分布を示す指標は生成されてこなかった．本研究では，これまで存在しなかった豪雨と浸水の

影響を示す指標を定義し，指標化モデルによる生成を行った．

さらに本研究では，被災状況の把握を目的として，観測値と推定値に必要な時間間隔と空間分解能の算出手法を提案した．気象現象や水害の規模は，地球環境や都市構造によって大きく変化する．現在，頻繁に発生している豪雨が，数年後にはより高頻度で大規模に発生する可能性も高い．その豪雨の程度によって，発生する浸水やその影響も変化する．指標化モデルは，豪雨と浸水の発生形態がどのように変化しても，その発生にあわせた観測値と推定値の生成が行える．

提案した推定手法は，限られた実測値から空白域の推定値をリアルタイムで高精度に算出する手法である．本研究で取り扱った降雨や河川に関する観測値以外に，観測には観測点が必要であり，常に必要な密度での観測が行われているとは限らない．低密度な観測点を補うための観測値の補完手法は，精度は高いが，データ数が多く算出や提供までの時間が長いことが一般的となる．そのため，本研究の推定手法は，即時性のある算出を第一の目的として，データ数の低減や算出手法の線形近似を図り，リアルタイムでの推定を実現した．これまで時間的，空間的なずれがあった既存の観測値，指標に比べ，このような即時性を重視した推定手法は，実際の防災対応において被災状況をリアルタイムで把握するために役立つと期待できる．

5.2. 本研究に関する今後の課題

5.2.1 誤検知，過検知時の処理

本研究の指標化モデルは，豪雨と浸水の影響について推定を可能とした．しかし，実際の観測値より低い指標が生成される誤検知や，影響が発生していない際に指標が大きく生成される過検知もみられた．実際に防災組織や被災地域の人々に指標を提供するためには，このように誤検知と過検知となった指標の処理を検討する必要がある．誤検知，過検知の処理には，周囲の観測値と比較して妥当性の高い指標を選定する手法や，画像のように近隣の状況が判別できる観測値を付与して提供する手法等，いくつかの手法が考えられる．今後，これらの手法を比較し，最適な処理を検討する必要がある．

5.2.2 高密度な観測の実現

本研究は，観測値をもとに豪雨と浸水の推定を行うモデルであり，観測値が入手できることが前提条件となる．東京都のような都市域や豪雨の多発地域，過去に浸水の発生した地域では観測機器の設置は充実しつつある．豪雨と浸水は特定の地域で発生する事象ではなく，全国の様々な地域で発生の可能性がある．また，地球環境の変化により，これまで発生しなかった地域でも豪雨と浸水が起きている．

このような状況下で，本研究の指標を活用するためには，観測機器の未設置地域でも高密度な観測を実現し，指標のもととなる観測値を生成する必要がある．しかし，観測機器は，設置や運用に多くの費用を必要とする．設置のために大規模な施設や設備が必要であることや，周囲に観測の障害となる施設があり，設置環境が整わないことも多い．本研究で用いた観測値である降水量や河川水位，浸水深のすべてにおいて，観測機器は十分に配備されておらず，観測の空白域が多い．そのため，高密度な観測網を実現する必要がある．その手法のひとつとして，安価で小型の観測機器の開発を行い，設置に関する障壁を軽減やすることで高密度な観測を検討する．

5.3. 指標の活用に向けて

5.3.1 指標の情報提供

生成した指標を被災地域へ提供するためには，既存の情報提供環境が持つ情報提供時の遅延を改善した提供手法が必要となる．既存情報は，時空間に対応した情報ではなかったため，情報量が少なかった．本研究の指標により，時間的，空間的に詳細な情報生成が可能となり，提供が必要な情報量も増加した．また，これまでは発生タイミングや発生箇所にあわせた情報提供は検討されてこなかったが，指標を活用するためには提供面でも時空間分布の考慮が必要となる．しかし，これまでの情報量が少なく時空間分布を考慮した提供の必要がない状況下でも，既存の情報提供環境には遅延が発生していた．

本研究では適切な地域への迅速な情報提供の実現に向けて，提供タイミングの制御による遅延の改善と豪雨と浸水の発生規模に応じた提供提供の範囲を制御す

るために，情報提供の共通インタフェースを提案した．今後はこの情報共通インタフェースを用いた情報提供を構築するとともに，情報の提供タイミングと提供範囲の自律的な選択機能を付与することで，指標の情報提供を実現できると考えられる．

5.3.2 指標を提示する表現手法

本研究では，対象領域を格子に分割して，格子ごとに指標の生成を行っている．しかし，実際の豪雨と浸水の状況下の人々の行動には移動が伴うため，指標を活用するためには，1 つの格子だけではなく周辺の格子の指標を組み合わせた情報提供が必要となる．周辺の格子の指標を提供することで，より安全な避難経路の提示のような活用が考えられる．そのために，指標を提示するための表現手法として，地図と組み合わせた提示や近隣のランドマーク周辺の状況をあわせた提示等，いくつかの手法を検討し，受信機器ごとに，最適な提示手法を選定する．

5.3.3 被害拡大時の対応

実際に水害が進行すると情報提供環境に障害が起き，情報提供はより困難になる．豪雨による停電は家庭内のテレビや携帯電話基地局の機能停止を招く．浸水被害によって固定電話や携帯電話は水没し，豪雨の音によって防災行政無線や広報車の音声は聞くことができなくなる．本研究では被害が拡大する前の情報通信環境を前提として指標の生成を検討した．しかし，被害が拡大するにつれて情報通信網に影響が及び，(i) 停電や故障の発生による観測値の入手困難，(ii) 情報提供の遅延や欠落が発生すると考えられる．そのため，被害が拡大した後の指標の提供を実現するためには，停電や故障に柔軟に対応可能な情報通信網の構築や，情報通信網以外の手段を用いた情報提供，避難所等の主要な地点への情報提供と周辺地域への伝搬技術の開発等のいくつかの手法を検討，開発する必要がある．

5.4. 今後の展望

5.4.1 本研究の適用条件

本研究の指標生成は，高密度な観測値が存在するという前提のもとに提案を行った．またその観測値は正確な値を示し，詳細な時間間隔で入手できることが前提である．指標化モデルは，様々な種類の観測機器から得られる観測値を活用できるが，観測機器が持つ測定誤差や観測機器の違いによる観測値の差は，閾値の基準となる値を越えないことが必要となる．もう一つの条件として，豪雨と浸水が起きる降水量や河川水位の閾値が判明していることが必要となる．この閾値は，都市や河川ごとに異なる値である．閾値が存在しない場合，豪雨と浸水の観測値から発生条件を算出する．

5.4.2 他分野への適用

本研究で扱った豪雨と浸水の指標化モデルは，現況や周囲の状況について，レベル分けが必要とされる分野へ適用が可能である．なお，上記の適用条件を満たしていることが必要であり，算出されるレベルは観測値のような詳細な数値ではない．生成できる他の指標として，環境変化に関する指標，故障に関する指標が考えられる．環境に関する指標には，気温や湿度，日射量を用いた熱中症に関する指標の生成，風向や風速を用いた短時間強雨の発生可能性に関する指標の生成が考えられる．ただし，既存研究で行われている傘指数や暑さ指数のような軽微な環境変化の算出が必要な指標には向いていない．これは，本研究では観測機器がもつ誤差の処理を考慮していないためである．また故障に関する指標には，コンクリートの耐久検査結果や交通量，施工年月を用いた道路の経年劣化に関する指標が考えられる．このような他分野へ応用するためには，専門家による閾値の検討が必要となる．ただし，偶発故障のような突発的な事象への対応は難しい．

このように提案した指標化モデルについて，観測値に基づいた時空間情報としての指標の生成を行う目的でモデルの根幹を応用できる．他分野への応用するためには，本研究と同様に専門家によって指標を定義し，観測値と推定値からその

影響をどのように算出するか，時空間の回帰式を組み立て，指標化モデルに適用することが必要となる．

研 究 業 績

原著論文

1. 赤石一英，厚田大祐，天野篤，板井秀泰，宇田川真之，大原美保，小野田惠一，川口和哉，蔡垂功，須見徹太郎，関谷直也，高橋淳夫，武居信介，田中純一，谷原和憲，中村功，中村信郎，新堀賢志，布村明彦，廣井慧，松尾一郎，三島和子，水上知之, 平成 20 年 8 月末豪雨等に関する調査報告，災害情報，No.7，pp.1-22，2009.3

2. 廣井慧，横山仁，中谷剛，瀬戸芳一，安藤晴夫，三隅良平，妙中雄三，中山雅哉，砂原秀樹, 短時間強雨等の局地的極端現象に対する高校生の防災意識向上に向けた気象センサネットワークの活用，情報処理学会論文誌コンシューマ・デバイス＆システム，Vol.3，No.1，pp.10-20，2013.3

3. 廣井慧，妙中雄三，横山仁，中谷剛，瀬戸芳一，安藤晴夫，三隅良平，中山雅哉，砂原秀樹, 気象観測網を活用した水害向け危険指標生成モデルの提案とその評価，電子情報通信学会論文誌 B　ヒト・モノ・データをつなげるインターネットアーキテクチャ論文特集，Vol. J96-B，No. 10，pp.1198-1205，2013.10

国際会議

1. Kei Hiroi，Masato Yamanouchi，Hideki Sunahara，A Proposal of Disaster Information System Based on the Internet Technologies，IEEE Sensors 2010 Conference Waikoloa(Poster Session)，HI，USA，2010.11

2. Kei Hiroi, Hitoshi Yokoyama, Hideki Sunahara, Yoshiki Yamagata, Spatial Flooding Hazard Indices using Sensor Networks, IGU Kyoto Regional Conference Kyoto, Japan, 2013.8

3. Kei Hiroi, Yoshihito Seto, Futoshi Matsumoto, Yuzo Taenaka, Hideya Ochiai, Haruo Ando, Hitoshi Yokoyama, Masaya Nakayama, Hideki Sunahara, Accurate and Early Detection of Localized Heavy Rain by Integrating Multivendor Sensors in Various Installation Environments, IEEE Sensors 2013 Conference Baltimore, Maryland, USA, 2013.11

4. Kei Hiroi, Yoshiki Yamagata, A Design and Implementation of Risk Indicators for Flood Situations, International Conference and Utility Exhibition on: Green Energy for Sustainable Development 2014, Pattaya City, Thailand, 2014.3

研究報告

1. 廣井慧，山内正人，何暢，新堀賢志，松尾一郎，砂原秀樹，防災情報を伝達する自律分散協調システムに関する一考察〜地方自治体における防災情報システムを例に〜，日本災害情報学会 全国大会，2009.10

2. 廣井慧，山内正人，新堀賢志，松尾一郎，砂原秀樹，インターネット基盤を用いた防災情報システムの提案，電子情報通信学会 IA 研究会，Vol.109, No.351，pp.57-62，2009.12

3. 廣井慧，山内正人，何暢，新堀賢志，松尾一郎，砂原秀樹，インターネット基盤を用いた防災情報システムの提案，電子情報通信学会 IA 研究会，Vol.109, No.438，pp.129-134，2010.3

4. 廣井慧，遠峰隆史，杉浦一徳，災害情報の提供を目的とした時間・位置・トレンドを考慮した環境情報クラウドの実現，情報処理学会 DPS 研究会，No.40, pp.1-8，2010.3

5. 瀬戸芳一，横山仁，安藤晴夫，廣井慧，青木正敏，2011 年 8 月 26 日に東京都区部で発生した短時間強雨事例の解析-降水量分布と地上風系との関係について-，日本気象学会 2012 年度春季大会講演予稿集，101，115.，2012.5

6. 廣井慧，横山仁，中谷剛，瀬戸芳一，安藤晴夫，三隅良平，山内正人，中山雅哉，砂原秀樹，短時間強雨等の局地的極端現象に対する高校生の防災意識向上に向けた気象センサネットワークの活用，マルチメディア，分散，協調とモバイル (DICOMO2012) シンポジウム，2012.7

7. 廣井慧，妙中雄三，松井加奈絵，横山仁，砂原秀樹，河川水位観測に基づく河川リスク情報の生成と提供，インターネットコンファレンス 2012，2012.11

8. 廣井慧，妙中雄三，松井加奈絵，落合秀也，横山仁，砂原秀樹，河川洪水の危険指標生成モデルの提案，電子情報通信学会 IA 研究会，Vol.20，No.22，pp.1-4，2013.3

9. 廣井慧，妙中雄三，砂原秀樹，水害発生時における災害情報の到達率向上を目的とした情報共通インタフェースの提案，情報処理学会 IOT 研究会，Vol.61，No.4，pp.1-6，2013.5

10. 横山仁，安藤晴夫，瀬戸芳一，廣井慧，中山雅哉，楠研一，真木雅之，斎藤勇人，高橋日出男，都市の極端気象観測に向けた地上気象モニタリング (1): 夏季における東京都内の気象特性，日本地球惑星科学連合 2013 年大会，2013.5

11. 瀬戸芳一，横山仁，安藤晴夫，廣井慧，中山雅哉，楠研一，真木雅之，斎藤勇人，高橋日出男，都市の極端気象観測に向けた地上気象モニタリング (2): 都区部で発生する夏季の短時間強雨時における降水量分布と地上風系との関係，日本地球惑星科学連合 2013 年大会，2013.5

12. 廣井慧，横山仁，妙中雄三，中山雅哉，砂原秀樹，気象センサネットワークを活用した災害情報提供による高校生への防災教育，マルチメディア，分散，協調とモバイル (DICOMO2013) シンポジウム，2013.7

13. 廣井慧，井上朋哉，仲倉利浩，妙中雄三，加藤朗，砂原秀樹，Web カメラを活用した浸水観測ネットワーク FloodEye の構築と評価，インターネットコンファレンス 2013，2013.10

報告書

1. 廣井慧，横山仁，中谷剛，瀬戸芳一，安藤晴夫，三隅良平，妙中雄三，中山雅哉，砂原秀樹，気象センサネットワークを活用した短時間強雨に対する高校生の防災教育システム / A Study on Sensor Networks for Efficient Scheme of Local HeavyRains:Disaster Prevention Awareness for High School Students，東京都環境科学研究所 2012 年度年報，pp.186-193，2013.3

2. 瀬戸芳一，横山仁，安藤晴夫，廣井慧，藤原孝行，高橋日出男，高密度地上気象モニタリング網を用いた東京都区部における短時間強雨事例の解析，東京都環境科学研究所 2012 年度年報，pp.184-185，2013.3

一般講演・その他

1. 廣井慧，東京都環境科学研究所の取り組み，LiveE! 2011 年度高大連携事業成果報告会，2012.3

2. 廣井慧，東京における温暖化とゲリラ豪雨等局地的極端現象との関係解析に関する研究，LiveE!シンポジウム 2012，2012.9

3. 廣井慧，防災教育と災害情報提供，LiveE! 2012 年度高大連携事業 成果報告会，2013.3

4. 廣井慧，防災情報を伝達する自律分散協調システム（Poster Session），2009 年 WIDE 夏研究会，2010.9

5. 廣井慧，河川水位観測に基づく河川リスク情報の生成と提供，2012 年 WIDE 冬研究会，2012.12

謝　　辞

本研究の指導教員であり，幅広い知見から的確な指導と暖かい励ましやご指摘をいただきました，慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の砂原秀樹教授に心から感謝いたします.

研究の方向性や論文執筆について様々な助言やご指導，暖かい励ましをいただきました，慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の加藤朗教授に心から感謝いたします.

研究指導や論文執筆等，数多くの助言をいただきました，慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の岸博幸教授に心から感謝いたします.

審査委員をお引き受けいただき，数多くの助言やご指摘，丁寧なご指導をいただきました，東京大学の鷹野澄教授に深く感謝いたします.

審査委員をお引き受けいただき，幅広い知見から的確なご指導と数多くの助言をいただきました，東北大学の今村文彦教授に深く感謝いたします.

研究指導や論文執筆等，数多くの助言や根気強く暖かい叱咤激励をいただきました，東京大学の中山雅哉教授に心から感謝いたします．鋭いご指摘や暖かいご指導，励ましをいただきました，IIJ INNOVATION INSTITUTE の島慶一主幹研究員に心から感謝いたします．数多くの助言やご指導をいただきました，慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の杉浦一徳准教授に心から感謝いたします．研究の方向性についての丁寧なご指導と数多くの示唆をいただきました，インド工科大学ハイデラバード校の片岡広太郎客員助教に心から感謝いたします．研究の進め方や論文の書き方について一から丁寧に教えてくださり，多くの時間を割いて根気強く優しいご指導をいただきました，北陸先端科学技術大学院大学の井上朋哉博士に心から感謝いたします．研究活動，論文執筆や学外発表等に関しての熱意あふれるご指導や貴重な機会をいただきました，東京大学の妙中雄三助教に心から感謝いたします.

数多くの研究に関する示唆や熱いご指導，貴重な機会をいただきました，東京都環境科学研究所の横山仁副参事研究員に心から感謝いたします．雨量計や浸水計のデータ解析や開発を全面的に助けてくださり，数多くの助言と示唆をいただきました，株式会社ディー・エス・アイの豊田隆志様に心から感謝いたします．環境センシングについて数多くの助言や丁寧なご指導，貴重な機会をいただきました，国立環境研究所の山形与志樹先生に心から感謝いたします．空間統計について数多くの助言や丁寧なご指導をいただきました，国立環境研究所の瀬谷創特別研究員に心から感謝いたします．気象や防災教育に関する深い造詣と信念をもち，いつも優しくご指導やご助言をいただきました，防災科学技術研究所の三隅良平総括主任研究員，中谷剛総括主任研究員に心から感謝いたします．東京都環境科学研究所の皆様，Live E!プロジェクトの皆様に心から感謝いたします．

研究活動，論文執筆や学外発表等に関して，さまざまな助言や機会をいただきました，慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の松井加奈絵氏に心から感謝いたします．いつも松井さんと一緒に励まし合って，笑顔と笑いの絶えない研究生活を過ごせました．生活面と研究面で数多くの良い刺激をいただけたおかげで，こうして博士論文をまとめることができました．

いつも近くで励まし支えてくださった，慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の仲倉利浩氏に心から感謝いたします．慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科 NetworkMedia Project の須田真実氏，徳山眞実氏，影澤秀明氏，西原政比彦氏，堀越朝氏，Media Telescope Asia Project の遠峰隆史氏，村瀬結衣氏をはじめとする皆様に心から感謝いたします．皆様との研究生活を通し，多くの刺激と示唆を得ることができました．

私の生活に癒しと潤いを与えてくださった，北陸先端科学技術大学院大学 篠田陽一教授をはじめとする wideMHB の皆様に心から感謝いたします．さりげない優しさや研究に関する示唆，多くの楽しい時間をいただいたこと，皆様と共に研究生活を送れたことは私にとって何よりの励みとなりました．

経済面や生活面において強力な支援をいただきました母に心から感謝いたします．研究に対し深い理解を示してくれた母の暖かい励ましや優しい支えがなければ，研究生活は成り立たなかったと思います．大学院進学に理解を示し，研究の機会を与えてくれた父に心から感謝いたします．病床から私の行く末を常に心配

し続けていた父に，こうして研究生活を過ごしている私の姿を見せることができなかったことが悔やまれます．この研究を行うことで，志半ばで亡くなった父の遺志を少しでも継いでいけたらと願うばかりです．

最後に，風水害により犠牲になられた方のご冥福をお祈りいたします．被害に遭われた方々へお見舞い申し上げ，一日も早い復興を願うとともにこの研究が被害の軽減の一助となるように祈念いたします．

参 考 文 献

[1] 宮澤清治. 台風・気象災害全史. 日外アソシエーツ, 2008.

[2] ヘルムート・ウーリッヒ. シュメール文明　古代メソポタミア文明の源流. 佑学社, 1979.

[3] 大熊孝. 洪水と治水の河川史 水害の制圧から受容へ. 平凡社, 2007.

[4] S. J. Lambert and J. C. Fyfe. Changes in winter cyclone frequencies and strengths simulated in enhanced greenhouse warming experiments results from the models participating in the ipcc diagnostic exercise. *Climate Dyn.*, Vol. 26, pp. 713–728, 2006.

[5] 小林文明. 集中豪雨の謎を解く. 災害列島 2000 都市型水害を考える, p. 12, 2001.

[6] 廣井脩. 集中豪雨時のソフト対策. 河川レビュー, Vol. 130, pp. 19–25, 2005.

[7] Asian Disaster Reduction Center. `http://www.adrc.asia/top_j.php`, 2013.

[8] Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. `http://www.cred.be/`, 2013.

[9] 東京大学新聞研究所編. 災害と情報. 東京大学新聞研究所, 1984.

[10] 干川剛史. 災害時における ict 活用のあり方. 災害情報, Vol. 4, pp. 29–39, 2006.

[11] 内閣府防災担当. 平成 24 年防災白書. http://www.bousai.go.jp/hakusho/h24/index.htm, 2013.

[12] Kei Hiroi, Hitoshi Yokoyama, Hideki Sunahara, Yoshiki Yamagata. Spatial flooding hazard indices using sensor networks. IGU Kyoto Regional Conference Kyoto, Japan, 2013.

[13] Kei Hiroi, Yoshiki Yamagata. A design and implementation of risk indicators for flood situations. International Conference and Utility Exhibition on: Green Energy for Sustainable Development 2014, Pattaya City, Thailand, 2014.

[14] 廣井慧, 横山仁, 中谷剛, 瀬戸芳一, 安藤晴夫, 三隅良平, 妙中雄三, 中山雅哉, 砂原秀樹. 短時間強雨等の局地的極端現象に対する高校生の防災意識向上に向けた気象センサネットワークの活用. 情報処理学会論文誌コンシューマ・デバイス＆システム, Vol. 3, pp. 10–20, 2013.

[15] 廣井慧, 妙中雄三, 横山仁, 中谷剛, 瀬戸芳一, 安藤晴夫, 三隅良平, 中山雅哉, 砂原秀樹. 気象観測網を活用した水害向け危険指標生成モデルの提案とその評価. 電子情報通信学会論文誌 B　ヒト・モノ・データをつなげるインターネットアーキテクチャ論文特集, Vol. J96-B, pp. 1198–1205, 2013.

[16] 廣井慧, 妙中雄三, 松井加奈絵, 横山仁, 砂原秀樹. 河川水位観測に基づく河川リスク情報の生成と提供. インターネットコンファレンス 2012, 2012.

[17] 廣井慧, 妙中雄三, 松井加奈絵, 落合秀也, 横山仁, 砂原秀樹. 河川洪水の危険指標生成モデルの提案. 電子情報通信学会 IA 研究会, 第 20 巻, pp. 1–4, 2013.

[18] 廣井慧, 井上朋哉, 仲倉利浩, 妙中雄三, 加藤朗, 砂原秀樹. Web カメラを活用した浸水観測ネットワーク floodeye の構築と評価. インターネットコンファレンス 2013, 2013.

[19] 廣井慧, 山内正人, 何暢, 新堀賢志, 松尾一郎, 砂原秀樹. 防災情報を伝達する自律分散協調システムに関する一考察〜地方自治体における防災情報システムを例に〜. 日本災害情報学会 全国大会, 2009.

[20] 廣井慧, 山内正人, 新堀賢志, 松尾一郎, 砂原秀樹. インターネット基盤を用いた防災情報システムの提案. 電子情報通信学会 IA 研究会, 第 109 巻, pp. 57–62, 2009.

[21] 廣井慧, 山内正人, 何暢, 新堀賢志, 松尾一郎, 砂原秀樹. インターネット基盤を用いた防災情報システムの提案. 電子情報通信学会 IA 研究会, 第 109 巻, pp. 129–134, 2010.

[22] 廣井慧, 遠峰隆史, 杉浦一徳. 災害情報の提供を目的とした時間・位置・トレンドを考慮した環境情報クラウドの実現. 情報処理学会 DPS 研究会, pp. 1–8, 2010.

[23] 廣井慧, 妙中雄三, 砂原秀樹. 水害発生時における災害情報の到達率向上を目的とした情報共通インタフェースの提案. 情報処理学会 IOT 研究会, 第 61 巻, pp. 1–6, 2013.

[24] 廣井慧, 横山仁, 妙中雄三, 中山雅哉, 砂原秀樹. 気象センサネットワークを活用した災害情報提供による高校生への防災教育. マルチメディア，分散，協調とモバイル (DICOMO2013) シンポジウム, 2013.

[25] 武田喬男. 雨の科学. 成山堂書店, 2005.

[26] 白石栄一. 局地的な降雨観測・予測技術の動向. 科学技術動向, 2009.

[27] NHK 放送文化研究所. NHK 気象・災害ハンドブック. 日本放送出版協会, 2005.

[28] 饒村曜. 大気現象と災害. 近代消防社, 2012.

[29] 気象庁. 平成 24 年 7 月九州北部豪雨の発生要因について. http://www.jma.go.jp/jma/press/1207/23a/20120723_kyushu_gouu_youin.pdf, 2012.

[30] 鈴木由人, 甲斐憲次. 関東地方におけるヒートアイランドと夏季雷雨に関する研究　1995 年 8 月 2 日の事例解析. 日本気象学会大会講演良予稿集 89, 2006.

[31] 小林文明. ヒートアイランドが降水におよぼす影響　東京周辺における積乱雲の発達. 日本気象学会 2003 年度春季大会シンポジウム「ヒートアイランド-熱帯夜の熱収支」, 2004.

[32] 横山仁. 東京における暑熱化の実態と極端現象. 東京都環境科学研究所公開研究発表会, 2014.

[33] 高橋裕. 河川工学. 東京大学出版会, 2008.

[34] 独立行政法人防災科学技術研究所自然災害情報室.　災害はどこでどのように起きているか. http://dil.bosai.go.jp/workshop/02kouza_jirei/firstpage/index.html, 2008.

[35] 防災科学技術研究所. 2011 年 9 月台風 12 号：那智勝浦町における被災状況, 2011.

[36] 玉井信行. 「都市型水害対策に関する緊急提言」が伝えたかったもの. 災害列島 2000 都市型水害を考える, p. 24, 2001.

[37] 辻本哲郎. 都市型水害対策に必要なもの. 災害列島 2000 都市型水害を考える, p. 44, 2001.

[38] 新田尚, 住明正, 伊藤朋之, 野瀬純一編. 気象ハンドブック. 朝倉書店, 2005.

[39] 内閣府防災担当.　防災情報のページ. http://www.bousai.go.jp/index.html, 2013.

[40] 高橋裕. 河川工学. 東京大学出版会, 2008.

[41] 気象庁. 警報・注意報の種類. http://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/bosai/warning_kind.html, 2013.

[42] 気象庁.　指定河川洪水予報. http://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/bosai/flood.html, 2013.

[43] 集中豪雨時等における情報伝達及び高齢者等の避難支援に関する検討会. 避難勧告等の判断・伝達マニュアル作成ガイドライン. http://www.bousai.go.jp/3oukyutaisaku/pdf/04_shiryou2.pdf, 2005.

[44] 災害応急対策制度委員会. 災害の情報伝達・避難支援のポイント. ぎょうせい, 2005.

[45] 気象庁. 衛星観測画像について. http://www.jma-net.go.jp/sat/data/web/satobs.html, 2013.

[46] 気象庁. レーダ・ナウキャスト. http://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/kurashi/kotan_nowcast.html, 2013.

[47] 東京都下水道局. 東京アメッシュ. http://tokyo-ame.jwa.or.jp, 2012.

[48] 防災科学技術研究所. 首都圏 x バンド気象レーダネットワーク（x-net）. http://mp-radar.bosai.go.jp, 2013.

[49] 気象庁. アメダス. http://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/amedas/kaisetsu.html, 2013.

[50] LiveE!プロジェクト. デジタル百葉箱. http://www.live-e.org/instrument/instrument04.html, 2013.

[51] 国土交通省. 統一河川情報システム. http://bousai.frics.jp, 2013.

[52] 東京都建設局. 東京水防災総合情報システム. http://www.kasen-suibo.metro.tokyo.jp/im/tsim0101g.html, 2013.

[53] 国土交通省河川局. 第 4 回日米治水及び水資源管理会議. 日本における河川情報管理の取り組みについて, 2008.

[54] 国土交通省東北地方整備局, 財団法人河川情報センター. 仙台湾沿岸域 浸水センサー状況提供システム. http://www.suigai.river.or.jp/shinsui/pc/, 2013.

[55] 岡崎市防災危機管理課危機管理班. 浸水警報装置（サイレン），水位計，浸水計. http://www.city.okazaki.aichi.jp/100/965/bosai/p008303.html, 2013.

[56] 中根和郎, 長坂俊成, 臼田裕一郎, 田口仁, 八文字弘行, 藤原健治, 鈴木豪, 野島亮兵. リアルタイム浸水情報の実用化, 2012.

[57] 気象庁. 気象観測の手引き. http://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/kansoku_guide/tebiki.pdf, 1998.

[58] 新千歳航空測候所. 観測機器. http://www.jma-net.go.jp/kushiro-airport/kushiro-web/sokki.html, 2012.

[59] 牛尾知雄, 水谷文彦, 和田将一, 吉川栄一, 中村佳敬, 森本健志, 河崎善一郎. 気象用フェーズドアレイレーダ開発の概要と計画. 電子情報通信学会総合大会講演論文集, 2009.

[60] 国土交通省四国地方整備局. 水文観測. http://www.skr.mlit.go.jp/kasen/mizu/index.html, 2003.

[61] 国土交通省. XRAIN. http://www.river.go.jp/xbandradar/, 2013.

[62] NTT docomo. ドコモ環境ライブ. http://docomo-live.jp/, 2013.

[63] ウェザーニューズ, KDDI. ソラを見守るアンテナ「ソラテナ」. http://weathernews.jp/door/soratena/, 2013.

[64] 新保明彦. レーダー・アメダス解析雨量 (i). 天気, Vol. 48, pp. 579–583, 2001.

[65] 新保明彦. レーダー・アメダス解析雨量 (ii). 天気, Vol. 48, pp. 777–784, 2001.

[66] 日本気象協会. 傘指数. http://season.tenki.jp/season/indexes/umbrella/, 2013.

[67] ウェザーニューズ. ゲリラ雷雨メール. http://weathernews.jp, 2013.

[68] 豊橋市. TOYOHASHI 防災・災害情報. http://www.city.toyohashi.aichi.jp/bousai/, 2013.

[69] 田中信行, 太田琢磨, 槙原康隆. 流域雨量指数による洪水警報・注意報の改善. 測候時報, Vol. 75, pp. pp.35–69, 2008.

[70] G.Blschl G.Laaha1, J.O.Skien. Spatial prediction on river networks: comparison of top-kriging with regional regression. *Hydrological Process*, 2012.

[71] W.J.Wouter Botzen Jeroen C.J.H. Aerts. Flood-resilient waterfront development in new york city bridging flood insurance, building codes, and flood zoning. *Annals of the New York Academy of Sciences*, Vol. 1227, pp. pp.1–82, 2012.

[72] 岩佐義朗, 井上和也, 水鳥雅文. 氾濫水の水理の数値解析法. 京都大学防災研究所年報, Vol. 23, pp. pp.305–317, 1980.

[73] 秋山壽一郎, 重枝未玲, 小園裕司. 流域特性を考慮した都市域氾濫解析モデルと都市域での浸水プロセスの予知. 水工学論文集, Vol. 54, pp. pp.919–924, 2010.

[74] 関根正人, 河上展久. 都市における内水氾濫と地下街浸水の被害予測に関わる数値解析. 水工学論文集, Vol. 47, pp. pp.889–894, 2003.

[75] 赤桐毅一. 洪水ハザードマップについて（特集ハザードマップ最前線-その成り立ちと活用）. 基礎工, Vol. 38, pp. pp.30–33, 2010.

[76] 片田敏孝, 木村秀治, 児玉真. 災害リスク・コミュニケーションのための洪水ハザードマップのあり方に関する研究. 土木学会論文集 D, Vol. 63, pp. pp.498–508, 2007.

[77] 中村仁, 塩崎由人, 加藤孝明. ヨーロッパ諸国における洪水マップの類型に関する予備的調査. 生産研究, Vol. 64, pp. pp.647–649, 2012.

[78] Piers Blaikie, Terry Cannon, Ian Davis, Ben Wisner. At Risk: Natural Hazards，People's Vulnerability and Disasters. Routledge, 1994.

[79] Hideya Ochiai, Masahiro Ishiyama, Tsuyoshi Momose, Noriaki Fujiwara, Kosuke Ito, Hirohito Inagaki, Akira Nakagawa, Hiroshi Esaki. Fiap: Facility information access protocol for data-centric building automation systems. In *IEEE INFOCOM, M2MCN workshop*, 2011.

[80] 二宮洸三. 気象観測とデータ. 天気, Vol. 60, pp. pp.37–42, 2013.

[81] 文京区. 文京区水害ハザードマップ. http://bousaiweb.city.bunkyo.lg.jp/news/katei/documents/suigai-omote.pdf, 2013.

[82] 豊國永次. 都市域の流出モデルについて (3). 神戸大学農学部研究報告, Vol. 20, pp. 183–195, 1993.

[83] 村上隆博, 菊井稔宏, 嶋大尚, 清水基成. 雨量計の有効範囲に関する一考察. 砂防学会誌, Vol. 61, pp. pp.16–22, 2008.

[84] 武田喬男. 豪雨の特徴とメカニズム. 水工学に関する夏期研修会講義集, Vol. 20, pp. A.6.1–A.6.16, 1984.

[85] 内閣府. 青少年のインターネット利用環境に関する実態調査結果. http://www8.cao.go.jp/youth/youth-harm/chousa/index.html, 2011.

[86] 東京都教育委員会. 子供の携帯電話の利用に係る取組. http://www.kyoiku.metro.tokyo.jp/pickup/seisaku/net.pdf, 2010.

[87] 総務省. 社会生活基本調査結果. http://www.stat.go.jp/data/shakai/2011/pdf/houdou2.pdf, 2012.

[88] Federal Emergency Management Agency. Common Alerting Protocol. http://www.fema.gov/emergency-alert-system-participants, 2013.

[89] 気象庁. 気象庁防災情報 XML フォーマット 情報提供ページ. http://xml.kishou.go.jp, 2013.

[90] 一般財団法人マルチメディア振興センター. 公共情報コモンズ. http://www.fmmc.or.jp/commons/, 2013.

[91] 岩松暉, 池邉浩司. 新たな地域防災対策への道 (1) 地球温暖化がもたらす災害態様の今と昔. 季刊 消防科学と情報, 2010.

[92] 廣井脩. 災害情報論. 恒星社厚生閣, 1991.

[93] 廣井脩他. 2000 年東海豪雨災害における災害情報の伝達と住民の対応. 東京大学社会情報研究所調査研究紀要, Vol. 19, pp. 1–229, 2003.

[94] 赤石一英, 厚田大祐, 天野篤, 板井秀泰, 宇田川真之, 大原美保, 小野田惠一, 川口和哉, 蔡垂功, 須見徹太郎, 関谷直也, 高橋淳夫, 武居信介, 田中純一, 谷原和憲, 中村功, 中村信郎, 新堀賢志, 布村明彦, 廣井慧, 松尾一郎, 三島和子, 水上知之. 平成 20 年 8 月末豪雨等に関する調査報告. 災害情報, Vol. 7, pp. 1–22, 2009.

[95] 気象庁. 平成 20 年 8 月末豪雨. http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/new/jyunsokuji20080826-31.pdf, 2008.

[96] 佐用町台風第 9 号災害検証委員会. 台風第 9 号災害検証報告書, 2010.

[97] 東洋大学気候変動に対応した新たな社会の送出に向けた社会システムの改革プログラム. 極端気象に強い都市創り社会実験（一般市民）2011 年度報告書. 東洋大学, 2012.

[98] 佐用町台風第 9 号災害検証委員会. 佐用町台風 9 号災害検証報告書. http://www.town.sayo.lg.jp/kakuka/saigaifukkotaisaku/kensyouiinkai/kensyouhoukokusyo.pdf, 2013.

[99] 浅野俊幸, 下羅弘樹, 外間正浩, 天見正和, 佐土原聡. 災害対応情報の共有化を考慮した xml スキーマの設計. 情報知識学会誌, Vol. 18, pp. pp.220–239, 2008.

[100] 福岡捷二, 川島幹雄, 横山洋, 水口雅教. 市街地の氾濫シミュレーションモデルの開発と洪水被害軽減対策の研究. 土木学会論文集, Vol. 600, pp. pp.23–36, 1998.

付録 A
豪雨と浸水によって発生する影響

表 A.1: 豪雨と浸水によって発生する影響（[43] [95] [98] をもとに作成）

	発生する影響	被害地域	対象者	危険回避行動（被害拡大前）	危険回避行動（被害拡大後）
激流の発生	堤防の決壊	河川付近	河川付近の屋外を移動している人	川の周囲に近づかない，2 階以上の建物に避難する	川の周囲に近づかない，避難所あるいは頑丈な建物の高いところへ避難する，避難をするときは川，橋の周囲を避けて通る
	橋梁の決壊，越水			川の周囲に近づかない，道路情報に気をつける	
	鉄砲水			川の周囲に近づかない，道路情報に気をつける	
	家屋の損壊，半壊，全壊，流出	河川付近	河川付近の住宅，施設にいる人	避難用持ち出し袋，貴重品などの持ち出し準備をする，周囲の状況に気をつける	避難所あるいは頑丈な建物の高いところへ避難する
	車の水没，漂流		屋外を移動している人	車が水没する危険があることを伝える，川や橋の近くの道路を通らない	車での移動を控える，川や橋の近くの道路を通らない

[次頁に続く]

表 A.1: 豪雨と浸水によって発生する影響（続き）

	発生する影響	被害地域	対象者	危険回避行動（被害拡大前）	危険回避行動（被害拡大後）
激流の発生	洪水による危険な漂流物（石，樹木等）	河川付近	河川付近の住宅，施設にいる人，屋外を移動している人	避難をするとき以外は，外出を控える	移動中十分な注意を払う
浸水の発生	道路の冠水	市街地などの低地	市街地の住宅，施設にいる人	避難をするとき以外は，外出を控える	足元がみえないので，避難する際は足元に注意する
			屋外を移動している人	移動中十分な注意を払う，避難所あるいは頑丈な建物の高いところへ避難する	浸水道路を回避する，足元がみえないので，避難する際は足元に注意する
	アンダーパス，地下道の冠水		車で移動している人	該当箇所には近づかない，道路標識に注意する	該当箇所には近づかない，道路標識に注意する
	地下室等の地下空間の浸水		地下空間にいる人	地下空間に入らない，地上に上がる	地上に上がる
	足元の視界不良，マンホール等への落下		屋外を移動している人	避難をするとき以外は，外出を控える	移動中十分な注意を払う，避難所あるいは頑丈な建物の高いところへ避難する
	床上浸水		浸水地域の住宅，施設にいる人	自宅の 2 階以上の建物に避難する，避難用持ち出し袋，貴重品などの持ち出し準備をする，周囲の状況に気をつける	避難所あるいは頑丈な建物の高いところへ避難する
	床下浸水			今後の情報に注意する，電話機，携帯電話を浸水しない場所に移動する	2 階以上に避難する

[次頁に続く]

表 A.1: 豪雨と浸水によって発生する影響（続き）

	発生する影響	被害地域	対象者	危険回避行動（被害拡大前）	危険回避行動（被害拡大後）
浸水の発生	車両の浸水	市街地などの低地	浸水地域の住宅，施設にいる人	車が水没する危険があることを伝える	自動車での移動を控える
	下水等の汚水の混染			止水板や土嚢の準備，設置	止水板や土嚢の準備，設置
	鉄道敷の崩壊		屋外を移動している人	足元がみえないので，避難する際は足元に注意する	足元がみえないので，避難する際は足元に注意する
	停電，断水，電柱火災等のインフラ停止		浸水地域の住宅，施設にいる人	避難用日用品，食品，飲み水の準備，懐中電灯を準備する	避難所あるいは頑丈な建物の高いところへ避難する

付録B
豪雨と浸水によって発生する影響とインディケータ，指標の対応

表 B.1: 豪雨の影響，インディケータ，指標の対応

I_1	I_2	I_3	I_4	豪雨の影響	指標
0	0	0	0	-	影響なし
0	0	0	1	-	日常生活への影響
0	0	0	2	-	日常生活への影響
0	0	0	3	周辺での豪雨の危険	行動の制限
0	0	1	0	-	日常生活への影響
0	0	1	1	-	日常生活への影響
0	0	1	2	-	日常生活への影響
0	0	1	3	周辺での豪雨の危険	行動の制限
0	0	2	0	対象地点に豪雨接近の可能性あり	行動の制限
0	0	2	1	対象地点に豪雨接近の可能性あり	行動の制限
0	0	2	2	対象地点に豪雨接近の可能性あり	行動の制限
0	0	2	3	周辺での豪雨の危険	行動の制限
0	0	3	0	豪雨接近の危険	危険回避行動
0	0	3	1	豪雨接近の危険	危険回避行動
0	0	3	2	豪雨接近の危険	危険回避行動
0	0	3	3	豪雨接近，周辺での豪雨の危険	危険回避行動
0	1	0	0	-	日常生活への影響
0	1	0	1	-	日常生活への影響
0	1	0	2	-	日常生活への影響
0	1	0	3	周辺での豪雨の危険	行動の制限
0	1	1	0	-	日常生活への影響

[次頁に続く]

表 B.1: 豪雨の影響，インディケータ，指標の対応（続き）

I_1	I_2	I_3	I_4	豪雨の影響	指標
0	1	1	1	-	日常生活への影響
0	1	1	2	-	日常生活への影響
0	1	1	3	周辺での豪雨の危険	行動の制限
0	1	2	0	対象地点に豪雨接近の可能性あり	行動の制限
0	1	2	1	対象地点に豪雨接近の可能性あり	行動の制限
0	1	2	2	対象地点に豪雨接近の可能性あり	行動の制限
0	1	2	3	周辺での豪雨の危険	行動の制限
0	1	3	0	豪雨接近の危険	危険回避行動
0	1	3	1	豪雨接近の危険	危険回避行動
0	1	3	2	豪雨接近の危険	危険回避行動
0	1	3	3	豪雨接近，周辺での豪雨の危険	危険回避行動
0	2	0	0	対象地点の近傍に豪雨接近の可能性あり	行動の制限
0	2	0	1	対象地点の近傍に豪雨接近の可能性あり	行動の制限
0	2	0	2	対象地点の近傍に豪雨接近の可能性あり	行動の制限
0	2	0	3	周辺での豪雨の危険	行動の制限
0	2	1	0	対象地点の近傍に豪雨接近の可能性あり	行動の制限
0	2	1	1	対象地点の近傍に豪雨接近の可能性あり	行動の制限
0	2	1	2	対象地点の近傍に豪雨接近の可能性あり	行動の制限
0	2	1	3	周辺での豪雨の危険	行動の制限
0	2	2	0	対象地点や近傍に豪雨接近の可能性あり	行動の制限
0	2	2	1	対象地点や近傍に豪雨接近の可能性あり	行動の制限
0	2	2	2	対象地点や近傍に豪雨接近の可能性あり	行動の制限
0	2	2	3	周辺での豪雨の危険	行動の制限
0	2	3	0	豪雨接近の危険	危険回避行動
0	2	3	1	豪雨接近の危険	危険回避行動
0	2	3	2	豪雨接近の危険	危険回避行動
0	2	3	3	豪雨接近，周辺での豪雨の危険	危険回避行動
0	3	0	0	豪雨接近の危険	危険回避行動
0	3	0	1	豪雨接近の危険	危険回避行動
0	3	0	2	豪雨接近の危険	危険回避行動
0	3	0	3	豪雨発生，継続の危険	危険回避行動
0	3	1	0	豪雨発生の危険	危険回避行動

[次頁に続く]

表 B.1: 豪雨の影響，インディケータ，指標の対応（続き）

I_1	I_2	I_3	I_4	豪雨の影響	指標
0	3	1	1	豪雨発生の危険	危険回避行動
0	3	1	2	豪雨発生の危険	危険回避行動
0	3	1	3	豪雨発生，継続の危険	危険回避行動
0	3	2	0	豪雨発生の危険	危険回避行動
0	3	2	1	豪雨発生の危険	危険回避行動
0	3	2	2	豪雨発生の危険	危険回避行動
0	3	2	3	豪雨発生，継続の危険	危険回避行動
0	3	3	0	豪雨発生，接近の危険	危険回避行動
0	3	3	1	豪雨発生，接近の危険	危険回避行動
0	3	3	2	豪雨発生，接近の危険	危険回避行動
0	3	3	3	豪雨発生，接近，継続の危険	危険回避行動
1	0	0	0	-	日常生活への影響
1	0	0	1	-	日常生活への影響
1	0	0	2	-	日常生活への影響
1	0	0	3	周辺での豪雨の危険	行動の制限
1	0	1	0	-	日常生活への影響
1	0	1	1	-	日常生活への影響
1	0	1	2	-	日常生活への影響
1	0	1	3	周辺での豪雨の危険	行動の制限
1	0	2	0	対象地点に豪雨接近の可能性あり	行動の制限
1	0	2	1	対象地点に豪雨接近の可能性あり	行動の制限
1	0	2	2	対象地点に豪雨接近の可能性あり	行動の制限
1	0	2	3	周辺での豪雨の危険	行動の制限
1	0	3	0	豪雨接近の危険	危険回避行動
1	0	3	1	豪雨接近の危険	危険回避行動
1	0	3	2	豪雨接近の危険	危険回避行動
1	0	3	3	豪雨接近，継続の危険	危険回避行動
1	1	0	0	-	日常生活への影響
1	1	0	1	-	日常生活への影響
1	1	0	2	-	日常生活への影響
1	1	0	3	周辺での豪雨の危険	行動の制限
1	1	1	0	-	日常生活への影響

[次頁に続く]

表 B.1: 豪雨の影響，インディケータ，指標の対応（続き）

I_1	I_2	I_3	I_4	豪雨の影響	指標
1	1	1	1	-	日常生活への影響
1	1	1	2	-	日常生活への影響
1	1	1	3	周辺での豪雨の危険	行動の制限
1	1	2	0	対象地点に豪雨接近の可能性あり	行動の制限
1	1	2	1	対象地点に豪雨接近の可能性あり	行動の制限
1	1	2	2	対象地点に豪雨接近の可能性あり	行動の制限
1	1	2	3	周辺での豪雨の危険	行動の制限
1	1	3	0	豪雨接近の危険	危険回避行動
1	1	3	1	豪雨接近の危険	危険回避行動
1	1	3	2	豪雨接近の危険	危険回避行動
1	1	3	3	豪雨接近，継続の危険	危険回避行動
1	2	0	0	対象地点の近傍に豪雨接近の可能性あり	行動の制限
1	2	0	1	対象地点の近傍に豪雨接近の可能性あり	行動の制限
1	2	0	2	対象地点の近傍に豪雨接近の可能性あり	行動の制限
1	2	0	3	周辺での豪雨の危険	行動の制限
1	2	1	0	対象地点の近傍に豪雨接近の可能性あり	行動の制限
1	2	1	1	対象地点の近傍に豪雨接近の可能性あり	行動の制限
1	2	1	2	対象地点の近傍に豪雨接近の可能性あり	行動の制限
1	2	1	3	周辺での豪雨の危険	行動の制限
1	2	2	0	対象地点や近傍に豪雨接近の可能性あり	行動の制限
1	2	2	1	対象地点や近傍に豪雨接近の可能性あり	行動の制限
1	2	2	2	対象地点や近傍に豪雨接近の可能性あり	行動の制限
1	2	2	3	周辺での豪雨の危険	行動の制限
1	2	3	0	豪雨接近の危険	危険回避行動
1	2	3	1	豪雨接近の危険	危険回避行動
1	2	3	2	豪雨接近の危険	危険回避行動
1	2	3	3	豪雨接近，継続の危険	危険回避行動
1	3	0	0	豪雨接近の危険	危険回避行動
1	3	0	1	豪雨接近の危険	危険回避行動
1	3	0	2	豪雨接近の危険	危険回避行動
1	3	0	3	豪雨発生，継続の危険	危険回避行動
1	3	1	0	豪雨発生の危険	危険回避行動

[次頁に続く]

表 B.1: 豪雨の影響，インディケータ，指標の対応（続き）

I_1	I_2	I_3	I_4	豪雨の影響	指標
1	3	1	1	豪雨発生の危険	危険回避行動
1	3	1	2	豪雨発生の危険	危険回避行動
1	3	1	3	豪雨発生，継続の危険	危険回避行動
1	3	2	0	豪雨発生の危険	危険回避行動
1	3	2	1	豪雨発生の危険	危険回避行動
1	3	2	2	豪雨発生の危険	危険回避行動
1	3	2	3	豪雨発生，継続の危険	危険回避行動
1	3	3	0	豪雨発生，接近の危険	危険回避行動
1	3	3	1	豪雨発生，接近の危険	危険回避行動
1	3	3	2	豪雨発生，接近の危険	危険回避行動
1	3	3	3	豪雨発生，接近，継続の危険	危険回避行動
2	0	0	0	対象地点で豪雨が発生する可能性あり	行動の制限
2	0	0	1	対象地点で豪雨が発生する可能性あり	行動の制限
2	0	0	2	対象地点で豪雨が発生する可能性あり	行動の制限
2	0	0	3	周辺での豪雨の危険	行動の制限
2	0	1	0	対象地点で豪雨が発生する可能性あり	行動の制限
2	0	1	1	対象地点で豪雨が発生する可能性あり	行動の制限
2	0	1	2	対象地点で豪雨が発生する可能性あり	行動の制限
2	0	1	3	周辺での豪雨の危険	行動の制限
2	0	2	0	対象地点で豪雨が発生する可能性あり	行動の制限
2	0	2	1	対象地点で豪雨が発生する可能性あり	行動の制限
2	0	2	2	対象地点で豪雨が発生する可能性あり	行動の制限
2	0	2	3	豪雨発生，継続の危険	行動の制限
2	0	3	0	豪雨接近の危険	危険回避行動
2	0	3	1	豪雨接近の危険	危険回避行動
2	0	3	2	豪雨接近の危険	危険回避行動
2	0	3	3	豪雨接近の危険	危険回避行動
2	1	0	0	対象地点で豪雨が発生する可能性あり	行動の制限
2	1	0	1	対象地点で豪雨が発生する可能性あり	行動の制限
2	1	0	2	対象地点で豪雨が発生する可能性あり	行動の制限
2	1	0	3	周辺での豪雨の危険	行動の制限
2	1	1	0	対象地点で豪雨が発生する可能性あり	行動の制限

[次頁に続く]

表 B.1: 豪雨の影響，インディケータ，指標の対応（続き）

I_1	I_2	I_3	I_4	豪雨の影響	指標
2	1	1	1	対象地点で豪雨が発生する可能性あり	行動の制限
2	1	1	2	対象地点で豪雨が発生する可能性あり	行動の制限
2	1	1	3	周辺での豪雨の危険	行動の制限
2	1	2	0	対象地点で豪雨が発生する可能性あり	行動の制限
2	1	2	1	対象地点で豪雨が発生する可能性あり	行動の制限
2	1	2	2	対象地点で豪雨が発生する可能性あり	行動の制限
2	1	2	3	周辺での豪雨の危険	行動の制限
2	1	3	0	豪雨接近の危険	危険回避行動
2	1	3	1	豪雨接近の危険	危険回避行動
2	1	3	2	豪雨接近の危険	危険回避行動
2	1	3	3	豪雨接近，継続の危険	危険回避行動
2	2	0	0	対象地点や近傍で豪雨が発生する可能性あり	行動の制限
2	2	0	1	対象地点や近傍で豪雨が発生する可能性あり	行動の制限
2	2	0	2	対象地点や近傍で豪雨が発生する可能性あり	行動の制限
2	2	0	3	周辺での豪雨の危険	行動の制限
2	2	1	0	対象地点や近傍で豪雨が発生する可能性あり	行動の制限
2	2	1	1	対象地点や近傍で豪雨が発生する可能性あり	行動の制限
2	2	1	2	対象地点や近傍で豪雨が発生する可能性あり	行動の制限
2	2	1	3	周辺での豪雨の危険	行動の制限
2	2	2	0	対象地点や近傍で豪雨が発生する可能性あり	行動の制限
2	2	2	1	対象地点や近傍で豪雨が発生する可能性あり	行動の制限
2	2	2	2	対象地点や近傍で豪雨が発生する可能性あり	行動の制限
2	2	2	3	周辺での豪雨の危険	行動の制限
2	2	3	0	豪雨接近の危険	危険回避行動
2	2	3	1	豪雨接近の危険	危険回避行動
2	2	3	2	豪雨接近の危険	危険回避行動
2	2	3	3	豪雨接近，継続の危険	危険回避行動
2	3	0	0	豪雨発生の危険	危険回避行動
2	3	0	1	豪雨発生の危険	危険回避行動
2	3	0	2	豪雨発生の危険	危険回避行動
2	3	0	3	豪雨発生，継続の危険	危険回避行動
2	3	1	0	豪雨発生の危険	危険回避行動

[次頁に続く]

表 B.1: 豪雨の影響，インディケータ，指標の対応（続き）

I_1	I_2	I_3	I_4	豪雨の影響	指標
2	3	1	1	豪雨発生の危険	危険回避行動
2	3	1	2	豪雨発生の危険	危険回避行動
2	3	1	3	豪雨発生，継続の危険	危険回避行動
2	3	2	0	豪雨発生の危険	危険回避行動
2	3	2	1	豪雨発生の危険	危険回避行動
2	3	2	2	豪雨発生の危険	危険回避行動
2	3	2	3	豪雨発生，継続の危険	危険回避行動
2	3	3	0	豪雨発生，接近の危険	危険回避行動
2	3	3	1	豪雨発生，接近の危険	危険回避行動
2	3	3	2	豪雨発生，接近の危険	危険回避行動
2	3	3	3	豪雨発生，接近，継続の危険	危険回避行動
3	0	0	0	対象地点で豪雨が発生	危険回避行動
3	0	0	1	対象地点で豪雨が発生	危険回避行動
3	0	0	2	対象地点で豪雨が発生	危険回避行動
3	0	0	3	対象地点で豪雨が発生しており，豪雨継続の危険がある	危険回避行動
3	0	1	0	対象地点で豪雨が発生	危険回避行動
3	0	1	1	対象地点で豪雨が発生	危険回避行動
3	0	1	2	対象地点で豪雨が発生	危険回避行動
3	0	1	3	対象地点で豪雨が発生しており，豪雨継続の危険がある	危険回避行動
3	0	2	0	対象地点で豪雨が発生	危険回避行動
3	0	2	1	対象地点で豪雨が発生	危険回避行動
3	0	2	2	対象地点で豪雨が発生	危険回避行動
3	0	2	3	対象地点で豪雨が発生しており，豪雨継続の危険がある	危険回避行動
3	0	3	0	対象地点で豪雨が発生しており，さらに豪雨が接近する危険がある	危険回避行動
3	0	3	1	対象地点で豪雨が発生しており，さらに豪雨が接近する危険がある	危険回避行動
3	0	3	2	対象地点で豪雨が発生しており，さらに豪雨が接近する危険がある	危険回避行動

[次頁に続く]

表 B.1: 豪雨の影響，インディケータ，指標の対応（続き）

I_1	I_2	I_3	I_4	豪雨の影響	指標
3	0	3	3	対象地点で豪雨が発生しており，さらに豪雨接近，継続の危険がある	危険回避行動
3	1	0	0	対象地点で豪雨が発生	危険回避行動
3	1	0	1	対象地点で豪雨が発生	危険回避行動
3	1	0	2	対象地点で豪雨が発生	危険回避行動
3	1	0	3	対象地点で豪雨が発生しており，豪雨継続の危険がある	危険回避行動
3	1	1	0	対象地点で豪雨が発生	危険回避行動
3	1	1	1	対象地点で豪雨が発生	危険回避行動
3	1	1	2	対象地点で豪雨が発生	危険回避行動
3	1	1	3	対象地点で豪雨が発生しており，豪雨継続の危険がある	危険回避行動
3	1	2	0	対象地点で豪雨が発生	危険回避行動
3	1	2	1	対象地点で豪雨が発生	危険回避行動
3	1	2	2	対象地点で豪雨が発生	危険回避行動
3	1	2	3	対象地点で豪雨が発生しており，豪雨継続の危険がある	危険回避行動
3	1	3	0	対象地点で豪雨が発生しており，さらに豪雨が接近する危険がある	危険回避行動
3	1	3	1	対象地点で豪雨が発生しており，さらに豪雨が接近する危険がある	危険回避行動
3	1	3	2	対象地点で豪雨が発生しており，さらに豪雨が接近する危険がある	危険回避行動
3	1	3	3	対象地点で豪雨が発生しており，さらに豪雨接近，継続の危険がある	危険回避行動
3	2	0	0	対象地点で豪雨が発生	危険回避行動
3	2	0	1	対象地点で豪雨が発生	危険回避行動
3	2	0	2	対象地点で豪雨が発生	危険回避行動
3	2	0	3	対象地点で豪雨が発生しており，豪雨継続の危険がある	危険回避行動
3	2	1	0	対象地点で豪雨が発生	危険回避行動
3	2	1	1	対象地点で豪雨が発生	危険回避行動

[次頁に続く]

表 B.1: 豪雨の影響，インディケータ，指標の対応（続き）

I_1	I_2	I_3	I_4	豪雨の影響	指標
3	2	1	2	対象地点で豪雨が発生	危険回避行動
3	2	1	3	対象地点で豪雨が発生しており，豪雨継続の危険がある	危険回避行動
3	2	2	0	対象地点で豪雨が発生	危険回避行動
3	2	2	1	対象地点で豪雨が発生	危険回避行動
3	2	2	2	対象地点で豪雨が発生	危険回避行動
3	2	2	3	対象地点で豪雨が発生しており，豪雨継続の危険がある	危険回避行動
3	2	3	0	対象地点で豪雨が発生しており，さらに豪雨が接近する危険がある	危険回避行動
3	2	3	1	対象地点で豪雨が発生しており，さらに豪雨が接近する危険がある	危険回避行動
3	2	3	2	対象地点で豪雨が発生しており，さらに豪雨が接近する危険がある	危険回避行動
3	2	3	3	対象地点で豪雨が発生しており，さらに豪雨接近，継続の危険がある	危険回避行動
3	3	0	0	対象地点，近傍で豪雨が発生	危険回避行動
3	3	0	1	対象地点，近傍で豪雨が発生	危険回避行動
3	3	0	2	対象地点，近傍で豪雨が発生	危険回避行動
3	3	0	3	対象地点，近傍で豪雨が発生しており，豪雨継続の危険がある	危険回避行動
3	3	1	0	対象地点，近傍で豪雨が発生	危険回避行動
3	3	1	1	対象地点，近傍で豪雨が発生	危険回避行動
3	3	1	2	対象地点，近傍で豪雨が発生	危険回避行動
3	3	1	3	対象地点，近傍で豪雨が発生しており，豪雨継続の危険がある	危険回避行動
3	3	2	0	対象地点，近傍で豪雨が発生	危険回避行動
3	3	2	1	対象地点，近傍で豪雨が発生	危険回避行動
3	3	2	2	対象地点，近傍で豪雨が発生	危険回避行動
3	3	2	3	対象地点，近傍で豪雨が発生しており，豪雨継続の危険がある	危険回避行動

[次頁に続く]

表 B.1: 豪雨の影響，インディケータ，指標の対応（続き）

I_1	I_2	I_3	I_4	豪雨の影響	指標
3	3	3	0	対象地点，近傍で豪雨が発生しており，豪雨接近の危険がある	危険回避行動
3	3	3	1	対象地点，近傍で豪雨が発生しており，豪雨接近の危険がある	危険回避行動
3	3	3	2	対象地点，近傍で豪雨が発生しており，豪雨接近の危険がある	危険回避行動
3	3	3	3	対象地点，近傍で豪雨が発生しており，豪雨接近，継続の危険がある	危険回避行動

表 B.2: 浸水の影響（浸水発生の有無），インディケータ，指標の対応

I_1	I_2	I_3	I_4	浸水の影響	指標
0	0	-	-	影響なし	影響なし
0	1	-	-	影響なし	影響なし
0	2	-	-	影響なし	影響なし
0	3	-	-	影響なし	影響なし
1	0	-	-	影響なし	影響なし
1	1	-	-	影響なし	影響なし
1	2	-	-	影響なし	影響なし
1	3	-	-	影響なし	影響なし
2	0	-	-	水位やや上昇	行動の制限
2	1	-	-	水位やや上昇	行動の制限
2	2	-	-	水位やや上昇	行動の制限
2	3	-	-	水位やや上昇，上昇傾向が継続の危険がある	行動の制限
3	0	-	-	浸水の発生	危険回避行動
3	1	-	-	浸水の発生	危険回避行動
3	2	-	-	浸水の発生	危険回避行動
3	3	-	-	浸水の発生，水位上昇の傾向が継続する危険がある	危険回避行動

表 B.3: 浸水の影響（浸水発生後），インディケータ，指標の対応

I_1	I_2	I_3	I_4	浸水の影響	指標
0	0	0	0	影響なし	影響なし
0	0	0	1	影響なし	影響なし
0	0	0	2	影響なし	影響なし
0	0	0	3	影響なし	影響なし
0	0	1	0	影響なし	影響なし
0	0	1	1	影響なし	影響なし
0	0	1	2	影響なし	影響なし
0	0	1	3	影響なし	影響なし
0	0	2	0	影響なし	影響なし
0	0	2	1	影響なし	影響なし
0	0	2	2	影響なし	影響なし
0	0	2	3	影響なし	影響なし
0	0	3	0	影響なし	影響なし
0	0	3	1	影響なし	影響なし
0	0	3	2	影響なし	影響なし
0	0	3	3	影響なし	影響なし
0	1	0	0	影響なし	影響なし
0	1	0	1	影響なし	影響なし
0	1	0	2	影響なし	影響なし
0	1	0	3	影響なし	影響なし
0	1	1	0	影響なし	影響なし
0	1	1	1	影響なし	影響なし
0	1	1	2	影響なし	影響なし
0	1	1	3	影響なし	影響なし
0	1	2	0	影響なし	影響なし
0	1	2	1	影響なし	影響なし
0	1	2	2	影響なし	影響なし
0	1	2	3	影響なし	影響なし
0	1	3	0	影響なし	影響なし
0	1	3	1	影響なし	影響なし
0	1	3	2	影響なし	影響なし

[次頁に続く]

表 B.3: 浸水の影響（浸水発生後），インディケータ，指標の対応（続き）

I_1	I_2	I_3	I_4	浸水の影響	指標
0	1	3	3	影響なし	影響なし
0	2	0	0	影響なし	影響なし
0	2	0	1	影響なし	影響なし
0	2	0	2	影響なし	影響なし
0	2	0	3	影響なし	影響なし
0	2	1	0	影響なし	影響なし
0	2	1	1	影響なし	影響なし
0	2	1	2	影響なし	影響なし
0	2	1	3	影響なし	影響なし
0	2	2	0	影響なし	影響なし
0	2	2	1	影響なし	影響なし
0	2	2	2	影響なし	影響なし
0	2	2	3	影響なし	影響なし
0	2	3	0	影響なし	影響なし
0	2	3	1	影響なし	影響なし
0	2	3	2	影響なし	影響なし
0	2	3	3	影響なし	影響なし
0	3	0	0	影響なし	影響なし
0	3	0	1	影響なし	影響なし
0	3	0	2	影響なし	影響なし
0	3	0	3	影響なし	影響なし
0	3	1	0	影響なし	影響なし
0	3	1	1	影響なし	影響なし
0	3	1	2	影響なし	影響なし
0	3	1	3	影響なし	影響なし
0	3	2	0	影響なし	影響なし
0	3	2	1	影響なし	影響なし
0	3	2	2	影響なし	影響なし
0	3	2	3	影響なし	影響なし
0	3	3	0	影響なし	影響なし
0	3	3	1	影響なし	影響なし

[次頁に続く]

表 B.3: 浸水の影響（浸水発生後），インディケータ，指標の対応（続き）

I_1	I_2	I_3	I_4	浸水の影響	指標
0	3	3	2	影響なし	影響なし
0	3	3	3	影響なし	影響なし
1	0	0	0	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	0	0	1	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	0	0	2	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	0	0	3	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	0	1	0	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	0	1	1	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	0	1	2	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	0	1	3	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	0	2	0	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	0	2	1	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	0	2	2	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	0	2	3	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	0	3	0	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	0	3	1	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	0	3	2	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	0	3	3	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	1	0	0	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	1	0	1	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	1	0	2	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	1	0	3	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	1	1	0	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	1	1	1	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	1	1	2	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	1	1	3	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	1	2	0	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	1	2	1	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	1	2	2	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	1	2	3	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	1	3	0	対象地点で浸水が発生	影響なし

[次頁に続く]

表 B.3: 浸水の影響（浸水発生後），インディケータ，指標の対応（続き）

I_1	I_2	I_3	I_4	浸水の影響	指標
1	1	3	1	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	1	3	2	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	1	3	3	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	2	0	0	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	2	0	1	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	2	0	2	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	2	0	3	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	2	1	0	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	2	1	1	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	2	1	2	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	2	1	3	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	2	2	0	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	2	2	1	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	2	2	2	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	2	2	3	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	2	3	0	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	2	3	1	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	2	3	2	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	2	3	3	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	3	0	0	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	3	0	1	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	3	0	2	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	3	0	3	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	3	1	0	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	3	1	1	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	3	1	2	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	3	1	3	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	3	2	0	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	3	2	1	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	3	2	2	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	3	2	3	対象地点で浸水が発生	影響なし

[次頁に続く]

表 B.3: 浸水の影響（浸水発生後），インディケータ，指標の対応（続き）

I_1	I_2	I_3	I_4	浸水の影響	指標
1	3	3	0	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	3	3	1	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	3	3	2	対象地点で浸水が発生	影響なし
1	3	3	3	対象地点で浸水が発生	影響なし
2	0	0	0	対象地点で浸水が発生	影響なし
2	0	0	1	対象地点で浸水が発生	影響なし
2	0	0	2	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	0	0	3	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	0	1	0	対象地点で浸水が発生	影響なし
2	0	1	1	対象地点で浸水が発生	影響なし
2	0	1	2	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	0	1	3	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	0	2	0	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	0	2	1	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	0	2	2	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	0	2	3	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	0	3	0	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	0	3	1	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	0	3	2	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限

[次頁に続く]

表 B.3: 浸水の影響（浸水発生後），インディケータ，指標の対応（続き）

I_1	I_2	I_3	I_4	浸水の影響	指標
2	0	3	3	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	1	0	0	対象地点で浸水が発生	影響なし
2	1	0	1	対象地点で浸水が発生	影響なし
2	1	0	2	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	1	0	3	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	1	1	0	対象地点で浸水が発生	影響なし
2	1	1	1	対象地点で浸水が発生	影響なし
2	1	1	2	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	1	1	3	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	1	2	0	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	1	2	1	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	1	2	2	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	1	2	3	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	1	3	0	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	1	3	1	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	1	3	2	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	1	3	3	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	2	0	0	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限

[次頁に続く]

表 B.3: 浸水の影響（浸水発生後），インディケータ，指標の対応（続き）

I_1	I_2	I_3	I_4	浸水の影響	指標
2	2	0	1	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	2	0	2	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	2	0	3	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	2	1	0	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	2	1	1	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	2	1	2	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	2	1	3	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	2	2	0	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	2	2	1	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	2	2	2	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	2	2	3	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	2	3	0	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	2	3	1	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	2	3	2	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	2	3	3	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	3	0	0	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限

[次頁に続く]

表 B.3: 浸水の影響（浸水発生後），インディケータ，指標の対応（続き）

I_1	I_2	I_3	I_4	浸水の影響	指標
2	3	0	1	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	3	0	2	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
2	3	0	3	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
2	3	1	0	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	3	1	1	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇の可能性あり	行動の制限
2	3	1	2	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
2	3	1	3	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
2	3	2	0	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
2	3	2	1	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
2	3	2	2	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
2	3	2	3	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
2	3	3	0	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
2	3	3	1	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
2	3	3	2	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
2	3	3	3	対象地点で浸水が発生しており，浸水深の上昇，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
3	0	0	0	大規模な浸水が発生	危険回避行動
3	0	0	1	大規模な浸水が発生	危険回避行動

[次頁に続く]

表 B.3: 浸水の影響（浸水発生後），インディケータ，指標の対応（続き）

I_1	I_2	I_3	I_4	浸水の影響	指標
3	0	0	2	大規模な浸水が発生	危険回避行動
3	0	0	3	大規模な浸水が発生	危険回避行動
3	0	1	0	大規模な浸水が発生	危険回避行動
3	0	1	1	大規模な浸水が発生	危険回避行動
3	0	1	2	大規模な浸水が発生	危険回避行動
3	0	1	3	大規模な浸水が発生	危険回避行動
3	0	2	0	大規模な浸水が発生	危険回避行動
3	0	2	1	大規模な浸水が発生	危険回避行動
3	0	2	2	大規模な浸水が発生	危険回避行動
3	0	2	3	大規模な浸水が発生	危険回避行動
3	0	3	0	大規模な浸水が発生	危険回避行動
3	0	3	1	大規模な浸水が発生	危険回避行動
3	0	3	2	大規模な浸水が発生	危険回避行動
3	0	3	3	大規模な浸水が発生	危険回避行動
3	1	0	0	大規模な浸水が発生	危険回避行動
3	1	0	1	大規模な浸水が発生	危険回避行動
3	1	0	2	大規模な浸水が発生	危険回避行動
3	1	0	3	大規模な浸水が発生	危険回避行動
3	1	1	0	大規模な浸水が発生	危険回避行動
3	1	1	1	大規模な浸水が発生	危険回避行動
3	1	1	2	大規模な浸水が発生	危険回避行動
3	1	1	3	大規模な浸水が発生	危険回避行動
3	1	2	0	大規模な浸水が発生	危険回避行動
3	1	2	1	大規模な浸水が発生	危険回避行動
3	1	2	2	大規模な浸水が発生	危険回避行動
3	1	2	3	大規模な浸水が発生	危険回避行動
3	1	3	0	大規模な浸水が発生	危険回避行動
3	1	3	1	大規模な浸水が発生	危険回避行動
3	1	3	2	大規模な浸水が発生	危険回避行動
3	1	3	3	大規模な浸水が発生	危険回避行動
3	2	0	0	大規模な浸水が発生，浸水継続の可能性あり	危険回避行動

[次頁に続く]

表 B.3: 浸水の影響（浸水発生後），インディケータ，指標の対応（続き）

I_1	I_2	I_3	I_4	浸水の影響	指標
3	2	0	1	大規模な浸水が発生，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
3	2	0	2	大規模な浸水が発生，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
3	2	0	3	大規模な浸水が発生，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
3	2	1	0	大規模な浸水が発生，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
3	2	1	1	大規模な浸水が発生，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
3	2	1	2	大規模な浸水が発生，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
3	2	1	3	大規模な浸水が発生，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
3	2	2	0	大規模な浸水が発生，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
3	2	2	1	大規模な浸水が発生，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
3	2	2	2	大規模な浸水が発生，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
3	2	2	3	大規模な浸水が発生，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
3	2	3	0	大規模な浸水が発生，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
3	2	3	1	大規模な浸水が発生，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
3	2	3	2	大規模な浸水が発生，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
3	2	3	3	大規模な浸水が発生，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
3	3	0	0	大規模な浸水が発生，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
3	3	0	1	大規模な浸水が発生，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
3	3	0	2	大規模な浸水が発生，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
3	3	0	3	大規模な浸水が発生，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
3	3	1	0	大規模な浸水が発生，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
3	3	1	1	大規模な浸水が発生，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
3	3	1	2	大規模な浸水が発生，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
3	3	1	3	大規模な浸水が発生，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
3	3	2	0	大規模な浸水が発生，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
3	3	2	1	大規模な浸水が発生，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
3	3	2	2	大規模な浸水が発生，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
3	3	2	3	大規模な浸水が発生，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
3	3	3	0	大規模な浸水が発生，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
3	3	3	1	大規模な浸水が発生，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
3	3	3	2	大規模な浸水が発生，浸水継続の可能性あり	危険回避行動
3	3	3	3	大規模な浸水が発生，浸水継続の可能性あり	危険回避行動