

博士論文

河川水害リスクの地理的構造の把握と  
その自然的・社会的要因の解明

Analysis of Geospatial Flood Risk Structure and its Natural and Social Factors

山田 真史

2019年3月

## 要旨

### 河川水害リスクの地理的構造の把握とその自然的・社会的要因の解明 Analysis of Geospatial Flood Risk Structure and its Natural and Social Factors

我が国の一級水系の治水目標の設定や、水系間の治水目標バランスの検討は、基準点流量に関する確率年評価に基づいている。一方で、各水系における治水事業効果を定量的に評価する際には、想定被害額と年超過確率の関係を表す曲線であるリスクカーブが用いられ、流域全体、あるいは流域を分割した氾濫ブロックのリスクカーブの事業前後の変化から便益を分析している。今後、将来的な気候変動による災害外力の強大化や、人口減少に伴う公共事業財源不足が想定される中では、効果的な治水事業への選択と集中が求められ、確率的・定量的リスク概念に基づいた治水事業評価の重要性は増していくと考えられる。

しかしながら、現状の確率的・定量的リスク評価は、各水系において個別に実施されるに留まっている。ある領域全体に関する 1 本のリスクカーブ、すなわち面的なリスクカーブを、複数の対象領域について比較検討し、水害リスク特性の地域性や多様性を明らかにすることは、各水系・地域の治水事業の効率検証、全国的な治水目標のバランスの再検討に繋がりを、面的な確率的リスク情報の活用例の提示となる。本研究では、面的なリスクカーブの領域間比較を通じた、水害リスクの地域性・多様性の検討を第一の目的とする。一方で、各地点のリスクカーブを算出することも近年の計算機の能力向上により可能となってきた。これらは前述の面的なリスクカーブと対比して、点的なリスクカーブであると言える。点的な確率的リスク情報の活用は未だ十分ではなく、また領域内部の各点の確率的リスク特徴は河川計画・治水計画において考慮されていない。本研究では、流域を点的な確率的リスク特性の類似性に基づいて構造化し、流域内部の水害リスクの地理的構造を明らかにすることを第二の目的とする。また、明らかにした水害リスクの地理的構造と、地形地質など自然的条件や、流域の歴史的発展や土地利用変化など社会的条件との関係进行分析し、水害リスクの地理的構造が成立する要因を明らかにすることを第三の目的とする。上述の 3 つの目的を通じて、面的・点的双方の水害リスク情報のさらなる活用可能性を提示するとともに、面的リスク情報の背後にあって見落とされてきた点的リスク情報への着目を促すことが、本研究全体のねらいである。

第一章「序論」では、我が国の治水政策における治水水準とリスク概念の扱いを整理し、治水水準が基準点流量など外力の確率的評価に基づく一方、確率的リスクは事業効果の裏付けにのみ用いられ、治水水準自体の妥当性検証には用いられてこなかったという歴史的経緯を指摘した。また、既往研究の整理から、面的な確率的リスク特性の比較によるリスクの地域性・多様性の議論が不足していること、および、点的な確率的リスク特性が地理的構造を持つという視点が欠落してきたことを示し、本研究が新規性を持つことを示した。



第二章「全国一級水系の回帰的リスク分析」では、我が国に 109 ある一級水系の面的なリスクカーブの比較から、面的な確率的リスク特性の多様性・地域性を分析した。リスクカーブの算出には水害統計に基づく Frequency-Damage 法（FD 法）を用いた。また、大量のリスクカーブを比較検討する手法として、再帰期間ごとの水害リスク寄与率を新たに提案・導入した。その結果、再帰期間 50~100 年の低頻度大被害年のリスク寄与率が最も大きい水系群（類型 A）が存在する一方、低頻度大被害年のリスク寄与率が最も小さい水系群（類型 C）も存在し、一級水系スケールでの面的な確率的リスク特性の多様性を定量的分析から明示した。さらに、類型 A の水系は大規模な平野・盆地の発達と人口の偏が生じるフォッサマグナ周辺の関東・東北南部に偏在すること、一方で、類型 C の水系は台風等の外力に対する高い治水水準とそれを上回る外力が生じる西南日本と稀に台風等が来襲する北海道東部の小流域に偏在することから、一級水系スケールでの面的な確率的リスク特性の地域性を示し、また流域スケール・地方スケールでの自然的・社会的条件がそれに影響している可能性を指摘した。

第三章「市区町村スケールの回帰的リスク分析と改良 FD 法の提案」では、我が国の市区町村の面的なリスクカーブの比較から、面的な確率的リスク特性の多様性・地域性を分析した。この際、市区町村スケールでは記録年度の大半で災害が記録されず、従来の FD 法では確率的リスク特性が再現できない問題がある。本研究では、災害が発生しない年を陽に考慮できる手法として、災害発生の有無を考慮するベルヌイ分布と災害発生時の被害を表す条件付き確率連続確率分布を複合した改良 FD 法を提案し、従来の FD 法と改良 FD 法の比較からリスクカーブ形状と年被害額期待値の双方について適用性が向上していることを確認し、市区町村スケールでの改良 FD 法の有用性を示した。続いて、改良 FD 法による市区町村のリスクカーブを再帰期間ごとの水害リスク寄与率に基づいて類型化し、再帰期間 50~100 年の低頻度大被害年のリスク寄与率が最も大きい水系群と、低頻度大被害年のリスク寄与率が最も小さい水系群の双方が存在し、市区町村スケールでの面的な確率的リスク特性の多様性を定量的分析から明示した。さらに、地域的分布に基づく地域性は見出されなかった一方で、同一の水系流域内部において隣接した市区町村が大きく異なる確率的リスク特性を持つ事例があることを指摘し、基礎自治体スケールの確率的リスク特性には、流域スケール・地方スケールより小さな地理的スケールでの自然的・社会的条件が影響している可能性を指摘した。

第四章「地先の水害リスクの算出と地理的構造化手法の提案」では、吉野川流域中下流部右岸側（吉野川市・石井町・徳島市の一部）を主な対象領域として、領域内各点でのリスクカーブおよびハザードカーブ（浸水深・年超過確率曲線）を算出し、それに基づいた領域の地理的構造化を試みた。はじめに、降雨アンサンブルデータ d4PDF と降雨流出氾濫一体モデル RRI を用いた合計 1500 仮想年に関する流出氾濫解析から、各セルでのリスクカーブ・ハザードカーブを算出した。続いて、多数の年超過確率曲線群の分類手法とし

て、第二章で提案した再帰期間ごとのリスク寄与率に基づく類型化に加えて、曲線群自体のクラスタリングによる曲線形状の類似性評価を提案した。双方の手法を用いた流域内の地理的構造化の結果、どちらも同様の地理的構造を抽出できていることが示され、その適用可能性を検証した。構造化の結果、谷底平野区間と蛇行原区間では、確率的リスク・ハザード特性の地理的構造が異なることが示された。谷底平野区間では、上流から下流に向けて縦断的に確率的リスク・ハザード特性が移り変わるといふ地理的構造が明らかとなり、一方で蛇行原区間では、本川からの距離に応じて蛇行原に対し横断的に確率的リスク・ハザード特性が移り変わるといふ地理的構造が明らかとなった。

第五章「水害リスクの地理的構造の要因分析」では、前章で指摘した谷底平野区間と蛇行原区間で異なる確率的リスク特性の地理的構造が生じる要因を考察した。吉野川中下流域は中央構造線に沿って東西に延びる直線的な谷底平野が特徴的であり、その左右岸で地質が異なる。北岸（左岸）の山塊は和泉層群主体の阿讃山地であり、その活発な土砂生産により左岸側支川群は急勾配の土石流型扇状地を形成する。一方で南岸（右岸）の山塊は三波川変成帯主体の剣山地であり、土砂生産量は少なく、右岸側支川群は扇状地を形成しない。吉野川市川島町上流の谷底平野区間（吉野川市旧山川町・同旧川島町）では谷幅自体が狭く、本川河道は北岸の支川扇状地により南岸山塊へ押しつけられ、山塊に河道が接する箇所ができる。こうして、下流側が閉塞した谷底平野では、支川が閉塞部に行く手を阻まれて本川へ合流する。そのため、最下流端の頻繁な湛水区域から上流に移動するにつれリスク・ハザードが変化する地理的構造が形成された。一方で、吉野川市川島町下流（吉野川市旧鴨島町、石井町、徳島市の一部）の蛇行原区間では、谷幅が拡大し北岸の扇状地も小規模になるため閉塞部は形成されず、度重なる流路の変化で本川と平行な支派川・旧河道群が発達した。支派川周りの低地は帯状の氾濫地帯となったが、江戸時代の間は、藍作のための洪水客土を得る必要性や、徳島城下への洪水流を抑える遊水池としての役割から、本川との間に堤防は設置されなかった。明治期に入り連続堤防が築堤されると、かつての派川が締切・堤内地化し帯状浸水域となり、また主要支川に沿った溢水型の帯状浸水域が形成される一方、その周囲の微高地・自然堤防が島状・帯状の低リスク・ハザード域となった。こうして、現河川と平行な確率的リスク・ハザード構造が形成された。以上の分析から、自然的要因として流域スケールの地質分布と土砂生産傾向・中地形分布が微高地・旧河道の分布に影響し、さらに社会的要因として歴史的治水政策・築堤過程が影響することで、谷底平野区間・蛇行原区間のそれぞれで異なる確率的リスク・確率的ハザードの地理的構造が成立したことを示した。

本研究の知見は、面的および点的な確率的リスク情報双方の活用可能性を示すものであるとともに、面的リスク情報の背後にあって見落とされてきた点的なリスク情報への着目を促すものであり、河川計画・治水政策上有効なものであると考えている。



## 謝辞

主査の知花武佳先生には、筆者が ENPC 留学から帰国し、修士 3 年生として河川／流域環境研究室に所属してからの 4 年間にわたり、数多くのご指導・ご助言をいただきました。様々な河川の現地観測や議論を通じて、研究の面白さをお教えいただきましたこと、深く感謝申し上げます。また、ご多忙のなか副査を引き受けてくださいました京都大学の立川康人先生、本学の田島芳満先生、本田利器先生、沼田宗純先生には、研究内容に関するご相談のたびに、各々のご専門を踏まえた多くの観点からのご意見・ご指摘をいただきましたこと、大変感謝申し上げます。さらに、本学の渡部哲史先生からはアメダス観測点を対象とした d4PDF バイアス補正降水量データセットを、防災科学技術研究所の大楽浩司先生からは電子版水害統計データを、生産技術研究所の山崎大先生からは 30m 版日本全体流向マップデータを、それぞれご提供いただきました。大変感謝申し上げます。

本研究は、研究室ゼミ等での小池俊雄先生・池内幸司先生・川崎昭如先生・平林由紀子先生・渡部哲史先生からの親切なご指導、学会・勉強会での諸先生方からのご助言、さらには本研究室に筆者とともに在籍した数十名の学友の皆様との現地観測・議論を通じて育まれたものであり、この場を借りてすべての皆様に感謝申し上げます。

本研究は、公益財団法人河川財団河川基金（助成番号 20175311004、代表：山田真史）、および、日本学術振興会特別研究員奨励費（JP18J11683、代表：山田真史）の助成を受けて実施されました。また、防災科学技術研究所との共同研究契約に基づき、水害統計電子版データセットを提供いただきました。さらに、本研究では創生プログラムのもとで作成された、地球温暖化施策決定に資する気候再現・予測実験データベース(d4PDF)を使用しました。ここに記して謝意を表します。

平成 31 年初春  
山田 真史



## 目次

要旨 .....	I
謝辞 .....	V
目次 .....	VII
図目次 .....	XI
表目次 .....	XV
<b>第 1 章 序論</b> .....	<b>1</b>
1-1. 背景 .....	1
1-2. 我が国の河川計画における水害リスクの扱い .....	3
1-2-1. 長期的治水水準の決定段階における水害リスクの扱い .....	3
1-2-2. 短期的事業計画の策定段階における水害リスクの扱い .....	4
1-2-3. 鈴鹿川水系河川整備計画策定段階での水害リスク情報の取り入れの試み .....	6
1-2-4. 確率的リスク特性のさらなる活用の可能性 .....	9
1-3. 水害リスクに関する既往研究の概観 .....	12
1-3-1. 確率的水害リスク評価手法に関する研究の概観 .....	12
1-3-2. 水害リスクの地域性に着目した研究の概観 .....	14
1-3-3. 水害リスクの地理的構造に着目した研究の概観 .....	14
1-3-4. 本研究の新規性 .....	15
1-4. 本研究の目的と構成 .....	16
<b>第 2 章 全国一級水系の回帰的リスク分析</b> .....	<b>19</b>
2-1. Frequency-Damage 法の概要 .....	20
2-1-1. Frequency-Damage 法の基本式および手法の概観 .....	20
2-1-2. FD 法に利用するデータの詳細 .....	21
2-1-3. 罹災世帯率・平均損傷率の確率分布推定 .....	22
2-1-4. モンテカルロ法による水害リスクカーブの算出 .....	22
2-1-5. 水害統計の詳細と水系単位の集計データの特徴 .....	23
2-1-6. FD 法による分析結果 .....	24
2-2. 確率的リスク特性の分析手法の導入 .....	24
2-2-1. 「再帰期間ごとのリスク寄与率」指標の定義 .....	24
2-3. 再帰期間ごとのリスク寄与率を用いた .....	27
2-3-1. 一級水系の確率的リスク特性の多様性 .....	30
2-3-2. 一級水系の確率的リスク特性の地域性 .....	30
2-4. 第 2 章のまとめ .....	33

第3章	市区町村スケールの回帰的リスク分析と改良FD法の提案	35
3-1.	改良Frequency-Damage法の提案	35
3-1-1.	従来のFrequency-Damage法の概要	35
3-1-2.	旧FD法の概要と小スケールの領域に適用する際の問題点	37
3-1-3.	改良Frequency-Damage法の概要	39
3-1-4.	改良FD法で導入する確率分布の尤度に関する検討	41
3-1-5.	改良FD法での平均損傷率Dの確率分布推定	43
3-1-6.	モンテカルロ法による水害リスクカーブの算出	44
3-2.	改良FD法と旧FD法の結果の比較	45
3-2-1.	検討対象	45
3-2-2.	結果を分析するための指標の導入	45
3-2-3.	内水を原因とする水害に関する新旧FD法の比較	49
3-2-4.	外水を原因とする水害に関する新旧FD法の比較	51
3-2-5.	内外水を原因とする水害に関する新旧FD法の比較	53
3-2-6.	改良FD法と従来のFD法の比較まとめ	54
3-3.	考察	55
3-3-1.	市区町村スケールの確率的リスク特性の分析	55
3-3-2.	流域内の自治体間の確率的リスク特徴の差異の例①：吉野川水系	57
3-3-3.	流域内の自治体間の確率的リスク特徴の差異の例②：最上川水系	59
3-3-4.	自治体間の確率的リスク特徴の差異と中地形分類	61
3-4.	本章のまとめ	62
第4章	地先の水害リスクの算出と地理的構造化手法の提案	65
4-1.	検討対象領域の概要	65
4-1-1.	吉野川水系の概要	65
4-1-2.	吉野川水系における過去の水害	68
4-1-3.	対象市区町村の概要	68
4-1-4.	計算対象フレームの概要	70
4-2.	氾濫解析モデルの概要・較正および反復氾濫計算の実施	71
4-2-1.	RRIモデルの概要	71
4-2-2.	本川・支川合流部での境界条件の設定	73
4-2-3.	使用データの概要	74
4-2-4.	d4PDFに基づく解析対象の降雨の抽出	75
4-2-5.	流出計算のキャリブレーション	78
4-2-6.	氾濫計算のキャリブレーション	82
4-2-7.	降雨抽出・流出計算・氾濫計算の実施および年最大浸水深の算出	86
4-3.	土地利用および浸水深に基づく被害額推定	87

4-3-1.	田んぼの浸水被害額 .....	87
4-3-2.	その他農地の浸水被害額 .....	88
4-3-3.	建物用地の浸水被害額 .....	88
4-3-4.	各年代の土地利用について .....	91
4-3-5.	2004年10月台風23号による浸水被害額の検証 .....	91
4-3-6.	浸水被害額推定の実施および水害リスクカーブ・ 水害ハザードカーブの作成 .....	94
4-4.	多数の水害リスクカーブおよび水害ハザードカーブの分析手法 .....	96
4-4-1.	水害リスクカーブと水害ハザードカーブの違い .....	96
4-4-2.	曲線の形状類似性に基づいた構造化手法：曲線自体のクラスタリング .....	97
4-4-3.	各手法の適用範囲 .....	99
4-5.	地理的構造の分析手法①：水害ハザードカーブに基づく分析 .....	100
4-5-1.	クラスタリング自体の結果および検討クラスタ数の決定 .....	100
4-5-2.	各クラスタの地理的分布と代表的ハザードカーブ .....	100
4-6.	地理的構造の分析手法②：水害リスクカーブに基づく分析 .....	108
4-6-1.	再帰期間ごとの被害額期待値のリスク寄与率に基づく類型化結果 .....	108
4-6-2.	氾濫ブロックごとの水害リスクの地理的構造の違い .....	114
4-7.	本章のまとめ .....	119
<b>第5章</b>	<b>水害リスクの地理的構造の自然的・社会的要因の分析 .....</b>	<b>121</b>
5-1.	自然的要因の分析 .....	121
5-1-1.	左右岸の地質に起因する支川扇状地の発達の違い .....	121
5-1-2.	谷底平野区間に着目した自然的要因 .....	122
5-1-3.	蛇行原区間に着目した自然的要因 .....	124
5-2.	社会的要因の分析 .....	125
5-2-1.	江戸期以前の吉野川流域 .....	125
5-2-2.	徳島藩の治水政策と農業政策 .....	126
5-2-3.	明治期の連続堤防化 .....	129
5-2-4.	蛇行原区間に着目した社会的要因のまとめ .....	132
5-2-5.	谷底平野区間に着目した社会的要因のまとめ .....	134
5-3.	本章のまとめ .....	135
<b>第6章</b>	<b>本研究のまとめ .....</b>	<b>137</b>
参考文献	.....	141





## 図目次

図 1-1	水害リスクカーブの形状による確率的リスク特性の差異の例.....	2
図 1-2	ブロック分割例 ([12]を筆者編集) .....	5
図 1-3	鈴鹿川水系の氾濫ブロック分割[15].....	6
図 1-4	各氾濫ブロックにおける堤防整備プランごとのリスクカーブの比較[13] .....	7
図 1-5	大野川水系における氾濫ブロック分割([18]を筆者編集).....	11
図 1-6	水害リスク分析の概観図[28, 29] .....	13
図 1-7	本研究の構成.....	17
図 2-1	FREQUENCY-DAMAGE 法の概要 ([34]を筆者編集) .....	20
図 2-2	阿武隈川水系における世帯罹災率 $F$ .....	23
図 2-3	阿武隈川水系における平均損傷率 $D$ .....	23
図 2-4	FD 法で求めた全国 109 一級水系の水害リスクカーブ .....	24
図 2-5	各再帰期間に対応する被害額期待値 .....	25
図 2-6	再帰期間ごとのリスク寄与率に基づくプロット領域.....	26
図 2-7	一級水系 109 流域に関する再帰期間ごとのリスク寄与率プロット.....	28
図 2-8	再帰期間ごとのリスク寄与率に基づく一級水系の類型分類地図.....	29
図 2-9	各類型に属する水系の水害リスクカーブ例 .....	29
図 2-10	日本全国の平均年間降雨量分布[54] .....	31
図 2-11	各地方の台風接近数と上陸数 (1951 年～2017 年) .....	32
図 3-1	FREQUENCY-DAMAGE 法の概要 ([34]を筆者編集) .....	36
図 3-2	0 の割合が多いデータ列に連続的な確率分布関数を当てはめた模式図.....	37
図 3-3	通常の連続確率分布を当てはめた場合の 罹災世帯率と年超過確率の関係 (従来の FD 法) .....	38
図 3-4	改良 FD 法で用いる確率分布を当てはめた場合の模式図.....	40
図 3-5	条件付き確率を導入した確率分布を当てはめた場合の 罹災世帯率と年超過確率の関係 (改良 FD 法) .....	40
図 3-6	実績被害額に基づく平均年間被害額 .....	46
図 3-7	リスクカーブに基づく被害額期待値 .....	46
図 3-8	被害額期待値が同一で形状が異なるリスクカーブの例 .....	47
図 3-9	面積差分の定義 .....	48
図 3-10	新旧 FD 法での内水に関するリスク推定値と平均年間被害額の比較.....	49
図 3-11	新旧 FD 法での内水に関する面積差分率の比較.....	50
図 3-12	新旧 FD 法での外水に関するリスク推定値と平均年間被害額の比較.....	51
図 3-13	新旧 FD 法での外水に関する面積差分率の比較 .....	52
図 3-14	新旧 FD 法での内水および外水に関するリスク推定値と平均年間被害額の比較.....	53

図 3-15	新旧 FD 法での内水および外水に関する面積差分率の比較.....	54
図 3-16	市区町村スケールでの再帰期間ごとの内外水リスク寄与率 .....	55
図 3-17	我が国の一般的な河川流域における中地形分類（[59,60]を筆者編集） .....	56
図 3-18	吉野川水系流域内の各自治体の確率的リスク特徴類型.....	57
図 3-19	吉野川市の改良 FD 法による内外水リスクカーブ .....	58
図 3-20	石井町の改良 FD 法による内外水リスクカーブ.....	58
図 3-21	最上川水系流域内の各自治体の確率的リスク特徴類型.....	59
図 3-22	山形市の改良 FD 法による内外水リスクカーブ.....	60
図 3-23	天童市の改良 FD 法による内外水リスクカーブ.....	61
図 4-1	吉野川水系流域概要[61].....	66
図 4-2	吉野川水系流域の地形概要[61, 62].....	66
図 4-3	四国地方の地質概要図（[64]を筆者編集） .....	67
図 4-4	吉野川流域の地質および地すべり分布図[61].....	67
図 4-5	吉野川水系における対象自治体の位置 .....	68
図 4-6	計算対象フレームの境界部 .....	70
図 4-7	計算対象フレーム内の自治体境界 .....	70
図 4-8	RRI モデルの構造[67].....	71
図 4-9	RRI モデルにおける河道と氾濫原の水位のパターン[70] .....	73
図 4-10	本川・支川合流地点.....	74
図 4-11	流出・氾濫解析を実施する降雨事象の抽出手法.....	76
図 4-12	流出計算領域の 300M メッシュ DEM.....	78
図 4-13	流出計算領域の河道網 .....	78
図 4-14	流出計算領域の 300M メッシュ土地利用.....	79
図 4-15	流出計算領域の 300M メッシュ森林域・非森林域 .....	79
図 4-16	2004 年 10 月台風 23 号出水の池田地点ハイドログラフ .....	81
図 4-17	2004 年 10 月台風 23 号出水の岩津地点ハイドログラフ .....	81
図 4-18	2014 年 8 月台風 11 号出水の池田地点ハイドログラフ .....	81
図 4-19	2004 年 8 月台風 11 号出水の岩津地点ハイドログラフ .....	81
図 4-20	氾濫計算領域の 30M メッシュ DEM.....	82
図 4-21	氾濫計算領域の河道網 .....	82
図 4-22	浸水計算領域の 30M メッシュ土地利用.....	83
図 4-23	浸水計算領域の 30M メッシュ森林域・非森林域 .....	83
図 4-24	2004 年 10 月台風 23 号による計算対象フレーム内部の浸水範囲.....	84
図 4-25	2004 年 10 月台風 23 号の浸水計算キャリブレーション結果.....	86
図 4-26	1977 年（昭和 52 年）の土地利用 .....	92
図 4-27	1986 年（昭和 61 年）の土地利用 .....	92
図 4-28	1991 年（平成 3 年）の土地利用 .....	92

図 4-29	1998 年（平成 9 年）の土地利用	93
図 4-30	2006 年（平成 18 年）の土地利用	93
図 4-31	2014 年（平成 26 年）の土地利用	93
図 4-32	RISK, HAZARD, EXPOSURE, VULNERABILITY の関係概念図（[85]を筆者編集）	94
図 4-33	第 4 章前半の計算フローチャート	95
図 4-34	水害リスクカーブと再帰期間ごとの被害額期待値の関係	97
図 4-35	曲線離散化の例	98
図 4-36	クラスタリング結果の樹形図	101
図 4-37	残クラスタ数と結合距離の関係	101
図 4-38	平均クラスタサイズと結合距離の関係	101
図 4-39	ハザードカーブのクラスタリングによる地理的構造化（クラスタ数 5）	102
図 4-40	各クラスタの代表的ハザードカーブ	103
図 4-41	クラスタリング結果（クラスタ数 5）と谷底平野・蛇行原の別	103
図 4-42	森林部をマスクしたクラスタリング結果（クラスタ数 5）	105
図 4-43	非森林部をマスクしたクラスタリング結果（クラスタ数 5）	105
図 4-44	全土地利用年代・全セルの再帰期間ごとの内外水リスク寄与率	108
図 4-45	1976 年（昭和 51 年）の土地利用に基づく水害リスクの構造	109
図 4-46	1987 年（昭和 62 年）の土地利用に基づく水害リスクの構造	109
図 4-47	1991 年（平成 3 年）の土地利用に基づく水害リスクの構造	109
図 4-48	1997 年（平成 9 年）の土地利用に基づく水害リスクの構造	110
図 4-49	2006 年（平成 18）の土地利用に基づく水害リスクの構造	110
図 4-50	2014 年（平成 26）の土地利用に基づく水害リスクの構造	110
図 4-51	1976 年（昭和 51 年）の土地利用に基づく年被害額期待値分布	112
図 4-52	1987 年（昭和 62 年）の土地利用に基づく年被害額期待値分布	112
図 4-53	1991 年（平成 3 年）の土地利用に基づく年被害額期待値分布	112
図 4-54	1997 年（平成 9 年）の土地利用に基づく年被害額期待値分布	113
図 4-55	2006 年（平成 18 年）の土地利用に基づく年被害額期待値分布	113
図 4-56	2014 年（平成 26 年）の土地利用に基づく年被害額期待値分布	113
図 4-57	谷底平野区間に関する図 4-50 の拡大図	115
図 4-58	谷底平野区間に関する図 4-39 の拡大図	115
図 4-59	蛇行平原区間に関する図 4-50 の拡大図	117
図 4-60	蛇行平原区間に関する図 4-39 の拡大図	117
図 5-1	四国地方の地質概要図（[64]を筆者編集）	121
図 5-2	吉野川水系水害治水分類図(1995)（[86]を筆者編集）	123
図 5-3	川島地区上流部の確率的ハザードの地理的構造	124
図 5-4	蛇行原区間の水害地形分類図拡大図（[86]を筆者編集）	124
図 5-5	1609 年頃（慶長 10 年頃）阿波国大絵図[93]	126

図 5-6	1641 年頃（寛永 18 年頃）阿波国大絵図[94].....	126
図 5-7	神宮入江川合流点付近（[101, 102]を筆者編集）.....	129
図 5-8	明治初頭にすでに建設されていた堤防（[103]をもとに筆者作成）.....	129
図 5-9	明治 8 年に計画された川島・藍畑間の連続堤防.....	130
図 5-10	明治 29 年までに築堤された堤防.....	131
図 5-11	昭和 2 年の第一期改修工事竣工時の堤防.....	131
図 5-12	江川・神宮入江川の旧遊水地の堤内地化.....	132
図 5-13	蛇行原区間の地理的構造のおおまかな区分.....	133
図 5-14	神宮堤・竜王堤付近標高段彩図.....	134

## 表目次

表 1-1 河川の重要度にも基づく治水目標流量の再帰年[10].....	3
表 1-2 治水経済評価マニュアル(案)に基づく便益計算表の例[12] .....	4
表 2-1 一般資産の項目別算出方法およびデータ出典.....	22
表 2-2 各小領域における再帰期間ごとのリスク寄与率の関係 .....	27
表 2-3 再帰期間ごとのリスク寄与率に基づく一級水系の類型化.....	28
表 3-1 水害記録の年数と水害の原因 .....	45
表 4-1 吉野川における昭和以降の主要な洪水および被害[61] .....	69
表 4-2 流出計算・浸水計算での使用データ概要 .....	75
表 4-3 吉野川水系のダム諸元 .....	80
表 4-4 流出計算の RRI モデルで設定したパラメタ .....	80
表 4-5 CONTINGENCY TABLE ANALYSIS の基本表.....	84
表 4-6 氾濫計算の RRI モデルで設定したパラメタ .....	85
表 4-7 選択されたパラメタ群での CONTINGENCY TABLE .....	85
表 4-8 田んぼおよびその他農地に関する浸水深別被害表.....	87
表 4-9 建物用地に関する浸水深別被害率 .....	89
表 4-10 2種類の分析手法の適用可能性 .....	99
表 4-11 各クラスタの特徴.....	104
表 4-12 谷底平野区間のリスク・ハザードの地理的構造概要 .....	114
表 4-13 蛇行原区間のリスク・ハザードの地理的構造概要.....	116



## 第1章 序論

### 1-1. 背景

我が国の一級水系の治水目標水準は、本川の流量に関する年超過確率が主として用いられ、全国の水系間の目標バランスの設定もまた、河川の重要度に基づいた年超過確率の割り振りによって決定されている[1]。一方で、各水系での治水事業効果を定量的に評価する際には、想定される被害額とその年超過確率の関係を表すリスクカーブが主として用いられ、流域全体、あるいは流域を複数の氾濫ブロックに区切ったサブ流域単位でのリスクカーブの変化から、その便益が分析される。今後、将来的な気候変動による災害外力の強化や[2, 3]、少子高齢化と人口減少に伴う公共事業財源の不足が予測される中で[4, 5]、社会資本整備審議会河川分科会は2015年に「水災害分野における気候変動適応策のあり方について～災害リスク情報と危機感を共有し、現在に取り組む社会へ～」という答申を発表した[6]。この答申においては、様々な規模の外力に対する災害リスクを評価し公表することを通じて、各主体がリスク情報に基づいた対策を促進することの必要性や、災害外力の発生頻度に応じてハード・ソフト対策を組み合わせた複合的な防災の推進が提言されている。このように、河川計画・治水事業の分野の中でも、より効果的な治水事業への選択と集中のため、リスク評価を主体とした治水事業の評価パラダイムの重要性は増していくと考えられる。

水害リスクの特性を分析する際の代表的な手法として、**水害リスクカーブ**の作成がある[7]。水害リスクカーブは各年の浸水被害額と年超過確率との関係を確率分布として示したものであり、水害リスクを水害の発生頻度と被害規模の関係として定量的かつ確率的に表現できる。水害リスクカーブを用いる第一の利点は、水害リスクカーブの左下領域の面積がその水害リスクカーブで表される確率的リスクの被害額期待値に等しく図形的な意味を持つことである。任意の再帰期間の区間に属する水害の被害額期待値を求めたい場合、その再帰期間の区間と対応した年超過確率の区間をとり、その区間に対応した水害リスクカーブの左下領域の面積を算出すれば良い。さらに、水害リスクカーブを用いる第二の利点は、水害リスクカーブの形状から、「どのような年超過確率の水害がどの程度だけ被害額期待値に、すなわちリスク推定値に寄与しているのか」を読み取ることが可能である点である。図1-1に示した3本のリスクカーブは、それぞれの左下面積、すなわち被害額期待値はほぼ同一である。しかしながら、赤い実線で示されたリスクカーブは、年超過確率が大きい領域、すなわち頻度の高い小災害に対応する領域では被害額は小さいものの、年超過確率が小さい領域、すなわち頻度の低い大災害に対応する領域では、被害額が急増するような特徴を持つことが、リスクカーブの形状から読み取れる。これとは対照的に、緑の破線で示されたリスクカーブは、年超過確率が大きい領域、すなわち頻度の高い小さな水害でもある程度の被害が生じてしまう一方で、年超過確率が小さくなり、災害外力規模が大きくなったとしても、被害額があまり変化しないような特徴を持つことが読み取れる。



青い鎖線で示されたリスクカーブは前述の2本のリスクカーブの中間的な形状であり、年超過確率が小さくなると災害外力が大きくなるほど被害額が増えるものの、赤い実線のリスクカーブのように一定規模以上の災害で被害額が急増することはない。水害リスクを被害額期待値のみで議論すると、この例に示されたような「水害リスクの確率的な側面」を見落とすおそれがある。水害リスクカーブを活用することで、「どのような年超過確率の水害がどの程度だけ被害額期待値に寄与しているのか」、「対象領域においては災害の年超過確率（すなわち外力規模）が変化することによりどのような想定被害の変化が生じるのか」という「**確率的リスク特性**」を明らかにすることができる。

河川工学の分野においては、前述の通りリスク情報の活用が図られ始めているが、一方で確率的リスク特性の分析手法は未だ発展途上にある。さらに、実際の河川計画において確率的リスク特性を事業に反映させるための方法論は未だ確立されていない。本研究の出発点は、水害リスクカーブおよび確率的リスク特性に関する知見の活用可能性と活用方法を探る必要性にある。

本章2節において、我が国の河川計画において水害リスクがどのように扱われてきたかを概観する。また本章3節において、水害リスクに関連した既往研究を整理する。最後に、本章4節において、これらの内容を踏まえて、本研究の目的および構成を述べる。

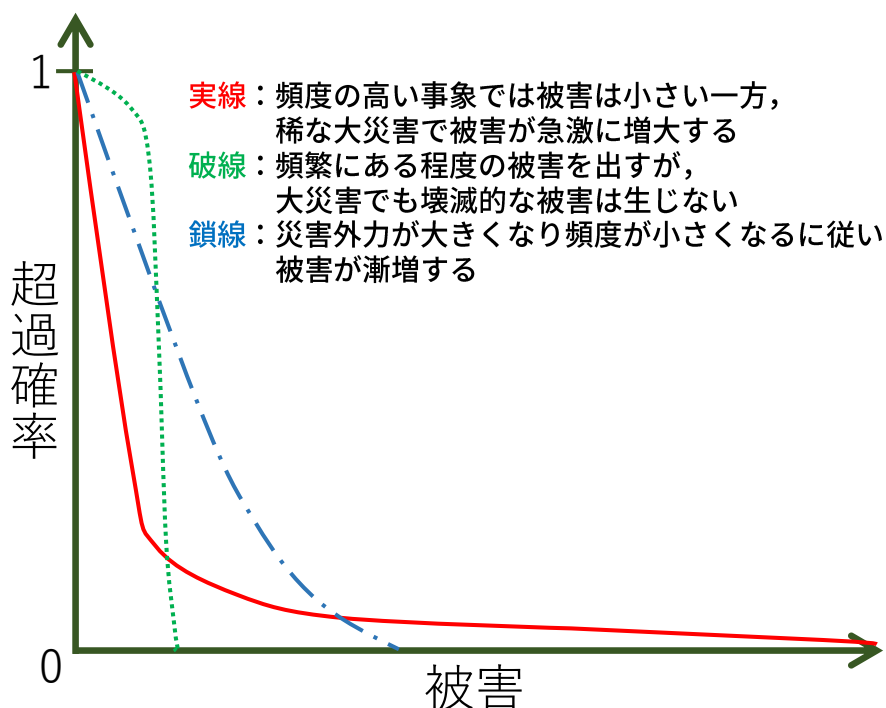


図 1-1 水害リスクカーブの形状による確率的リスク特性の差異の例

## 1-2. 我が国の河川計画における水害リスクの扱い

### 1-2-1. 長期的治水水準の決定段階における水害リスクの扱い

我が国の現在の河川計画において、治水水準は「河道が下流へ流すことができる最大流量の年超過確率」を用いて表される。流量の年超過確率とは、ある流量を超える流量が一年間に発生する確率であり、その流量の再帰年の逆数である。

明治期に西洋的な河川工学を取り入れて以降、我が国の治水政策においては、河道の通水能力を向上させるための築堤や浚渫を通じて、河道から溢れることなく流れることができる最大流量を増大させることで、治水水準の向上が図られてきた。それぞれの水系および河川における目標治水水準の設定は、1958年（昭和33年）の（旧）河川砂防技術基準案において年超過確率の概念が導入されて以降、主に年超過確率を用いて評価・決定されている[8, 9]。100年程度の長期計画である河川整備基本方針内での治水目標となる年超過確率および再帰年について、その歴史的な変遷を表1-1に示す[10]。

表 1-1 河川の重要度にも基づく治水目標流量の再帰年[10]

Present technical criteria for river works (from 2004)					
Importance of river	Class A	Class B	Class C	Class D	Class E
Return period	Over 200	100-200	50-100	10-50	Below 10
Technical criteria for river works in 1976					
Importance of river	Class A	Class B	Class C	Class D	Class E
Return period	Below 200	100-200	50-100	10-50	Below 10
The third 5-year national flood prevention plan in 1968					
Importance of river	Important rivers		Other rivers		
Return period	100-200		50		
The second 5-year national flood prevention plan in 1965					
Importance of river	Important rivers		Other rivers		
Return period	50		The second-largest historical flood in past record		
Technical criteria for river works in 1958					
Importance of river	Class A	Class B			
Return period	80-100	50-80			

このような「流量の年超過確率に基づき治水水準を決定する」という治水水準の決定手法においては、水害リスクカーブに示されるような水害リスクの観点とは考慮されていない。表1-1に示された「河川の重要度」は、「洪水防御計画の目的に応じて流域の大きさ、その対象となる地域の社会的経済的重要性、想定される被害の量と質、過去の災害の履歴などの要素を考慮して定める」[11]と説明されているものの、想定被害額の大きさに基づいて水系ごと・河川ごとの重要度を決定する運用はされていない。概ね一級河川の本川主要区間においてA級～B級、一級河川のその他区間および二級河川の都市河川区間でC級、その他一般河川等でD級～E級が採用されており[11]、概ね全国的に一律の基準であると考えられる。したがって、我が国の治水政策・河川計画の長期的な基本計画においては、水害リスクの観点に基づいた検討は行われていない。

1-2-2. 短期的事業計画の策定段階における水害リスクの扱い

我が国の法定河川計画には、100年程度の長期計画である河川整備基本方針と、30年程度の短期計画である河川整備計画が存在する。長期計画である河川整備基本方針については、水害リスクの観点に基づいた検討は行われていない。一方で、実施する整備内容を具体的に決定するのは河川整備計画である。それでは、河川整備計画の内部や、その策定段階においては、水害リスクの観点に基づいた検討は行われているのであろうか。

河川整備計画には計画期間である約30年間に実施すべき築堤・堤防嵩上げ等の具体的な実施区間が記載されている。その策定段階においては、実施する整備が公共事業において一般的に要求される経済的妥当性を有しているかを検証するために、治水経済評価マニュアル(案)[12]に基づいた費用便益分析を行うのが一般的である。

治水経済評価マニュアル(案)では、表1-2に示すように、検討対象の整備を行った場合と行わなかった場合のそれぞれについて、年超過確率が異なる様々な洪水に関する氾濫シミュレーションを実施し、整備を行わなかった場合に比した整備を行った場合の被害軽減額を算出する。続いて、年超過確率が隣り合う2つの洪水について、被害軽減額の平均値を区間平均被害軽減額として求め、これに区間確率を掛け合わせることで、年超過確率その区間であるような洪水に起因する年平均被害軽減額を求める。最後に、すべての年超過確率の区間について求めた年平均被害軽減額を合算することで、検討している整備による年平均被害軽減額期待値を算出する。求められた年平均被害軽減額期待値について、一般的には整備後50年の評価対象期間が終了するまでの値を現在価値化して総和を取ったものが、該当事業の総便益Bとして算出される。また、該当事業の各年の事業費を現在価値化して総和を取ったものが、該当事業の総費用Cとして算出される。

表 1-2 治水経済評価マニュアル(案)に基づく便益計算表の例[12]

流量規模	年平均超過率	被害額			区間平均被害額	区間確率	年平均被害額	年平均被害額の累計=年平均被害軽減期待値
		①事業を実施しない場合	②事業を実施した場合	③被害軽減額(①-②)				
$Q_0$	$N_0$			$D_0 (= 0)$	$\frac{D_0 + D_1}{2}$	$N_0 - N_1$	$d_1 = (N_0 - N_1) \times \frac{D_0 + D_1}{2}$	$d_1$
$Q_1$	$N_1$			$D_1$	$\frac{D_1 + D_2}{2}$	$N_1 - N_2$	$d_2 = (N_1 - N_2) \times \frac{D_1 + D_2}{2}$	$d_1 + d_2$
$Q_2$	$N_2$			$D_2$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$\vdots$				$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$Q_m$	$N_m$			$D_m$	$\frac{D_{m-1} + D_m}{2}$	$N_m - N_{m+1}$	$d_m = (N_{m-1} - N_m) \times \frac{D_{m-1} + D_m}{2}$	$d_1 + d_2 + \dots + d_m$

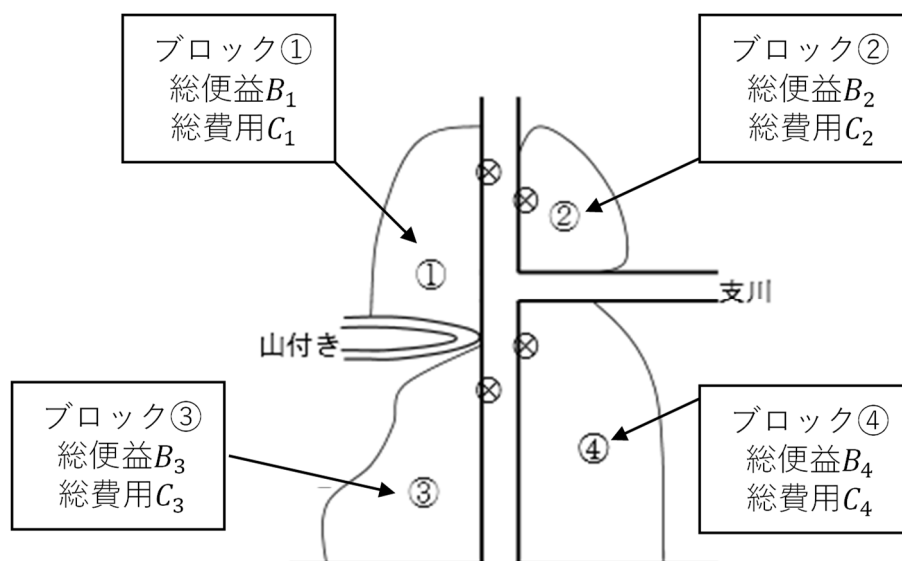


図 1-2 ブロック分割例 ([12]を筆者編集)

検討対象河川の氾濫原は、支川や山附部、横断構造物など氾濫水の挙動を制限する実体により線引きすることにより、それぞれが一連の氾濫区域とみなされる氾濫ブロックへと分割することができる。前述の事業総便益  $B$  や事業総費用  $C$  については、各氾濫ブロックについて個別に算出する。その過程においては、表 1-2 に明示されているように、異なる年超過確率に関する治水事業を行った場合と行わなかった場合それぞれの被害被害額を氾濫解析により算出していることから、各氾濫ブロックについて、治水事業を行った場合と行わなかった場合それぞれの被害リスクカーブを求めていることとなる。また、表 1-2 における年平均被害軽減額期待値  $\sum_i d_i$  の算出は、治水事業を行った場合の被害リスクカーブと、治水事業を行わなかった場合の被害リスクカーブとの間に挟まれた面積を求めていることとなる。

図 1-2 に、流域の氾濫ブロックへの分割を示した。このとき、現在用いられている平成 17 年版治水経済評価マニュアル（案）では、経済性の評価指標である費用便益比を以下のように算出する。

$$\text{Ratio} = \frac{\sum_i B_i}{\sum_i C_i} \quad \dots\dots \text{式(1-1)}$$

式(1-1)においては、分割後の各氾濫ブロックで個別に算出されていた総便益を全ブロックについて合算し、流域全体の総便益を算出し、それを同様に算出した流域全体の総費用で除している。すなわち、流域全体スケールと比べてより詳細な解像度で算出されたリスク情報は活用されていない。また、各ブロックの総便益についても、被害リスクカーブの下部領域の面積である被害額期待値に基づいて算出しており、被害リスクカーブの形状に示されるような確率的リスク特性までは考慮していないと言えよう。

### 1-2-3. 鈴鹿川水系河川整備計画策定段階での水害リスク情報の取り入れの試み

前節で述べたとおり，社会資本整備審議会河川分科会は2015年に「水災害分野における気候変動適応策のあり方について～災害リスク情報と危機感を共有し，現在に取り組む社会へ～」という答申を発表し[6]，災害外力が増大し，一方で社会資本整備予算が減少する中で，リスク情報に基づいた戦略的な整備対象の検討・選択の重要性を提起した．その翌年，2016年12月に策定された鈴鹿川水系河川整備計画は，上記答申を踏まえ，その検討段階から氾濫ブロックごとの水害リスクカーブを活用した初の事例である[13, 14]．

鈴鹿川水系河川整備計画の策定段階においては，治水経済評価マニュアル（案）に従い，国管理区間に関連する領域が10氾濫ブロックに分割された[15]．その後，年超過確率1/50, 1/150, 1/500, 1/1000の4つの外力規模の出水に関する各氾濫ブロックの浸水解析を後述の3つの堤防整備プランについて行い，水害リスクカーブの算出を行っている．

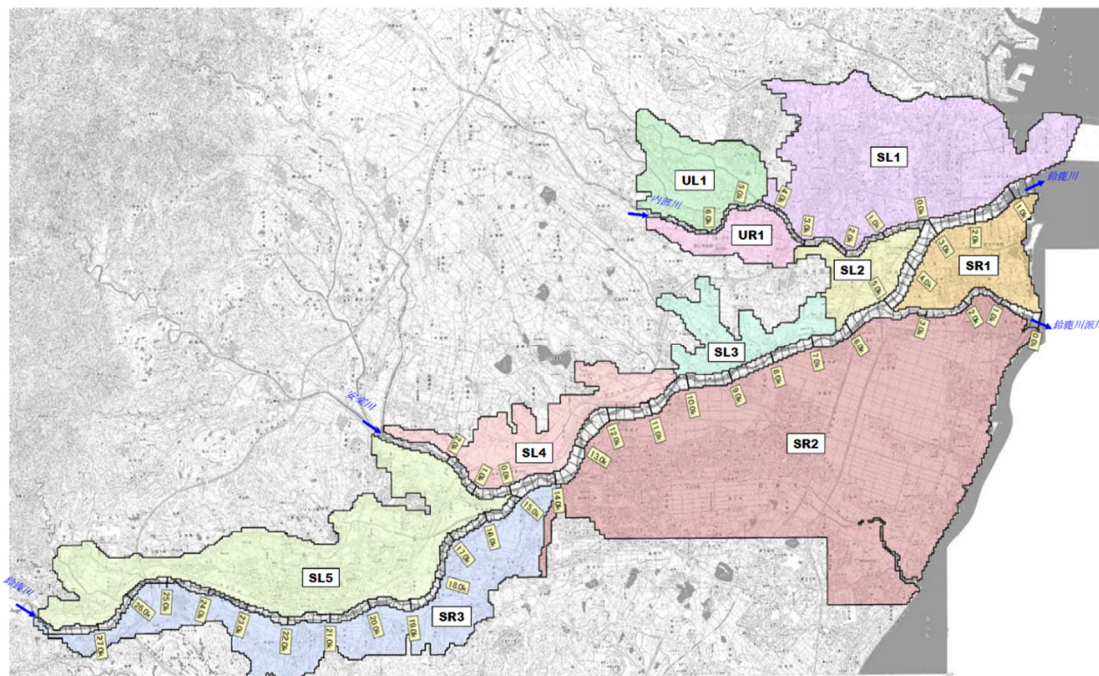


図 1-3 鈴鹿川水系の氾濫ブロック分割[15]

堤防整備プラン A は，国管理区間を上流区間と下流区間に分割し，下流区間をより高い治水安全度で整備する一方，上流区間は下流区間と比べて低い治水安全度の整備を行うものである．堤防整備プラン B は，国管理区間の全体を同一の治水安全度で整備する．プラン A と比較して，下流区間では治水安全度は減少し，上流区間では治水安全度は向上する．堤防整備プラン C は，資産が集中している下流区間の河口付近に集中して整備を行い，その区間では河川整備基本方針水準まで治水安全度を引き上げる一方で，それ以外の区間に関しては堤防整備等を行わない．これら3案，および堤防整備を行わなかった場合の計4パターンについて，氾濫ブロック毎のリスクカーブを図 1-4 に示す．



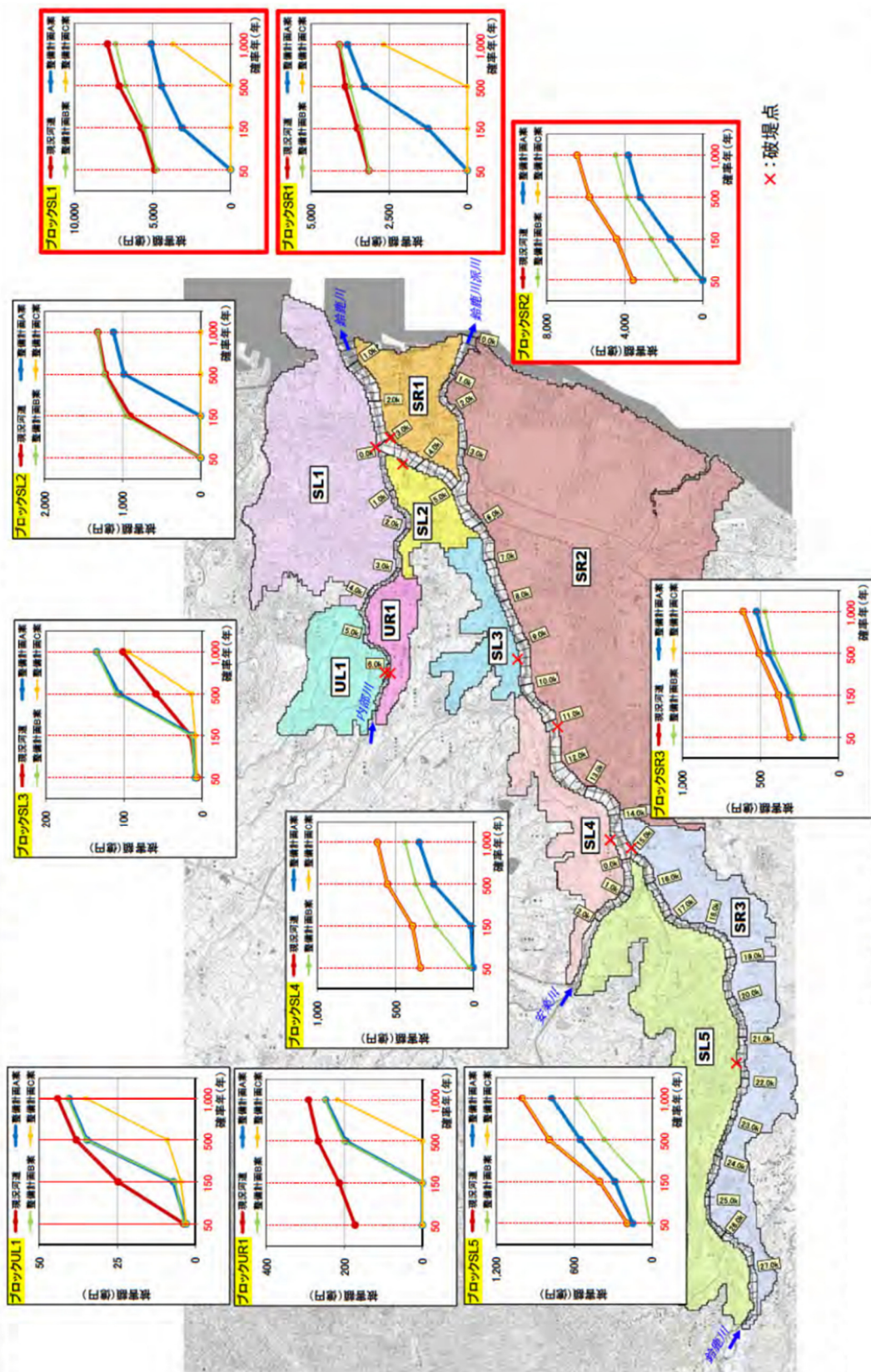


図 1-4 各氾濫ブロックにおける堤防整備プランごとのリスクカーブの比較[13]

実際の河川整備計画の検討段階では、被害額に関するリスクカーブの他に、想定される死者数等の検討を加え、A案の堤防整備プランが選択された。

鈴鹿川水系河川整備計画の策定プロセスにおいて行われたすべての氾濫ブロックについて個別に水害リスクカーブの比較検討は、我が国の河川計画においては初めての試みである。この試みの2つの側面からその革新性を述べることができる。第一の革新性は、各氾濫ブロックについて算出されていた年平均被害軽減額を、流域全体の総便益として一つの値に落とし込むことなく、各氾濫ブロックスケールにおける便益として議論している点である。各ブロックについて求めたリスクカーブを流域全体にアップするケールする従来の手法では、空間的解像度が粗くなることでリスク情報が失われていたが、鈴鹿川水系での試みでは、**空間的に詳細なリスク情報が、アップスケーリングにより損失することなく保存されている**。第二の革新性は、様々な超過確率に対応した水害に関する年平均被害額および年平均被害軽減額を算出した後、それらを年平均被害額期待値や年平均被害軽減額期待値のような一つの値に落とし込むことなく、水害リスクカーブのままに施策代替案の検討材料に利用していることである。前節で述べたとおり、水害リスクカーブは水害リスクの確率的リスク特性を表している一方で、水害リスクカーブの左下領域面積と等しい被害額期待値は、値として表現できるため理解が容易である一方で、その確率的リスク特性の情報を失ってしまう。被害額期待値や総便益のみでなく、**水害リスクカーブそのものを活用することで、被害額期待値においては失われてしまっている確率的リスク特性の情報を考慮できる**のである。被害額期待値だけではなく、確率的リスク特性までを考慮した堤防整備プランの選択は、確率的リスク特性を治水政策・河川計画に取り入れるための第一歩として位置づけられるであろう。

#### 1-2-4. 確率的リスク特性のさらなる活用の可能性

前項まで、我が国の治水政策・河川計画における水害リスクの扱いについて概観してきた。以下に要点を述べる。

- 100年程度の長期計画である河川整備基本方針
  - 治水水準の表現には流量の年超過確率主義が採用されており、氾濫時のリスク情報は考慮されていない。
  - 各水系において目標となる年超過確率の決定には「河川の重要度」が考慮されるが、この重要度は一級水系の主要な一級河川においてはA級もしくはB級で事実上統一されており、水害リスク情報に基づいた決定はされていない。
- 30年程度の短期計画である河川整備計画
  - 整備水準の表現には上位計画と同様に流量の年超過確率が用いられている。
  - 一方で、各計画における堤防整備等の具体的な整備内容に関する経済的妥当性を検証するために、整備を行った場合と行わなかった場合のそれぞれで氾濫解析による被害額推定が複数の年超過確率に対応する流量に関して行われている。氾濫解析は流域全体をより詳細に区分した「氾濫ブロック」単位で行われる。
  - 氾濫ブロック単位で複数の年超過確率に対応する被害額が算出され、水害リスクカーブの算出が可能な情報はその過程において求められている。
  - 治水経済評価マニュアル(案)に基づく経済性の検証では、各氾濫ブロックの年平均被害軽減額期待値を用いている。この値を算出する過程において、年超過確率と想定被害額の関係として表される水害リスクの確率的リスク特性情報は失われてしまう。
  - 氾濫ブロックの年平均被害軽減額期待値から求められる便益を各氾濫ブロック単位で算出し、それらを全ブロックについて合計した流域総便益が、事業全体の経済的妥当性評価には用いられる。流域総便益の算出過程において、氾濫ブロックスケールであった情報が流域スケールにアップスケールされるため空間的なリスク情報が失われてしまう。
- 2016年12月策定の鈴鹿川水系河川整備計画における水害リスク情報の扱い
  - 氾濫ブロック単位で算出された水害リスクカーブについて、各氾濫ブロック内で複数の河道整備プランについて比較している
    - ◇ 水害リスクカーブの形状に着目することで、各氾濫ブロックにおける確率的リスク特性に関する情報の活用を図っている
  - 氾濫ブロック単位で算出された水害リスクカーブについて、氾濫ブロック間での比較を通じた治水バランスを検討している
    - ◇ 氾濫ブロック単位で求めた空間的なリスク情報を、アップスケールで失うことなく活用を図っている



これまでの検討を踏まえると、我が国の治水政策・河川計画においては、水害リスク情報の検討が図られ始めているものの、その活用は未だ限定的と言えよう。また、鈴鹿川水系河川整備計画の策定過程において導入された水害リスク情報の活用手法に加えて、さらにいくつかの水害リスク情報活用の可能性を提起することもできる。

第一の活用可能性は、**水害リスク情報の水系間比較**である。各水系における水害リスク情報は、水系内部の治水事業の経済的妥当性評価にのみ用いられている。一方で、水系間の治水目標のバランスは河川砂防技術基準に基づいた河川整備基本方針に盛り込まれているが、水害リスク情報は活用されていない。次節において詳細を述べるが、水害リスクカーブに着目した既往研究[16, 17]は単一の流域や領域に着目しており、複数領域間での水害リスクカーブの比較によるリスクバランスの検討といった視点のものは未だ行われていない。したがって、**複数の水系に関する水害リスクカーブの比較を通じて、確率的リスク特性の地域性を分析することを通じて、全国的なリスクバランスの検討や、地域ごとの総合的リスク対策の検討を行うことが可能であると考えられる。**

第二の活用可能性は、**地先の確率的リスク情報に基づいた流域の構造化**である。図 1-5 に、大野川水系における流域の氾濫ブロック分割の例を示す。氾濫ブロックの分割は、図 1-2 に示したとおり、支川や山附部、横断構造物など氾濫水の挙動を制限する実体により線引きすることにより、それぞれが一連の氾濫区域とみなすことができるように行われている。一方で、いくつかの既往研究[16, 17, 18, 19]において、流域内の各地点・各地先レベルでのリスクは図 1-5 に示された氾濫ブロックの内部においても大きく異なり、その被災形態や頻度などの特徴は微地形条件・土地利用・集住形態等の影響を強く受けることが定性的分析から指摘されている。すなわち、地先の確率的リスク情報には地理的構造が存在する。しかし、氾濫ブロックスケールでの水害リスク分析では、スケールが地先の確率的リスク情報の地理的構造に比べて大きいため、その地理的構造を正しく反映できない。さらに、氾濫ブロックの分割自体も、地先のリスク情報に基づいたものではないため、地先の確率的リスク情報の構造を表すのに適切であるかは不透明である。したがって、**地先の確率的リスク情報を踏まえて流域をリスクの地理的構造として把握**することで、ゾーニング等に基づく水害リスク管理手法の検討や都市計画・土地利用計画へのリスク情報の組み込みが可能であると考えられる。

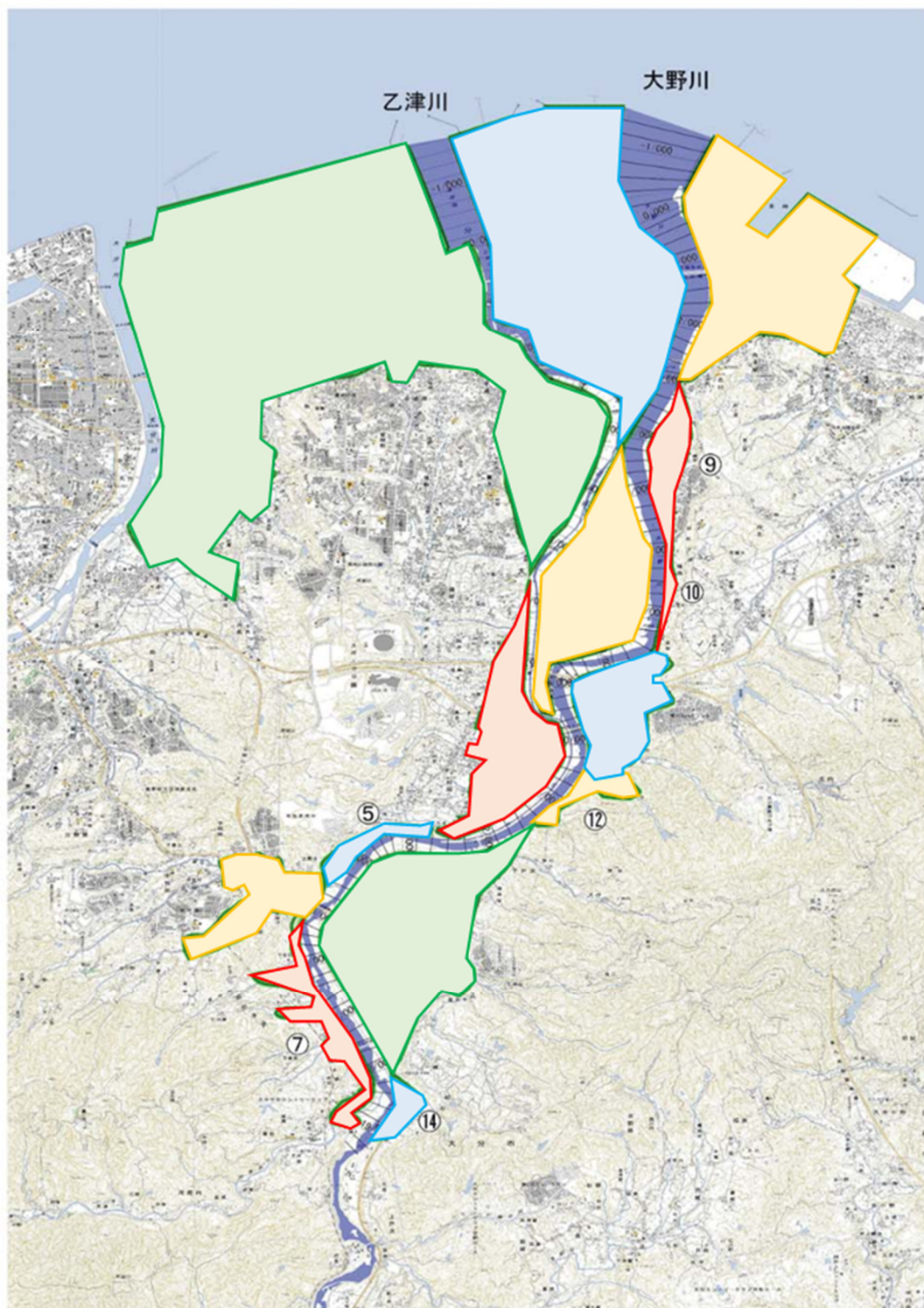


図 1-5 大野川水系における氾濫ブロック分割([18]を筆者編集)

### 1-3. 水害リスクに関する既往研究の概観

本節では、水害リスクに関する既往研究を概観し、前節で述べた我が国における河川計画での水害リスクの扱いが研究とどのように関係しているかを整理する。

#### 1-3-1. 確率的水害リスク評価手法に関する研究の概観

20世紀初頭からごく近年まで、治水政策の支配的なパラダイムは洪水防御であった[8]。すなわち、ある流量以下の洪水に対して外水氾濫を生じさせないような河道をどのように設計するのが、河川計画の主要な論点であった。しかしながら、流量観測データが蓄積され、また大規模な出水による氾濫被害の記録が増加するに従い、既往最大流量のみを治水目標に掲げる既往最大主義のみを用いた治水安全度設定は難しくなり、また公共事業の経済的妥当性に関する定量的な評価のためには、ある流量がどのような確率で発生するのかを把握する必要性が生じた。この需要を反映して、確率的な水文解析は流量の年超過確率に関する回帰的な分析手法を主として発展してきたと言える。洪水流量とその年超過確率に関する頻度解析手法は Gumbel により確立し[20]、以降急速に各国の治水計画に取り入れられていった。

一方で、20世紀後半においては、目標とする治水安全度を超える出水による被害が生じる事例が確認され始める。また堤防整備の進行により、従来は水害常襲地域としてみなされていた領域にまで経済活動が進出した結果、整備水準を超えた出水による被害額が堤防整備前よりも増大してしまう「Levee Effect」が White や高橋により指摘された[21, 22]。これらの知見を踏まえ、河道の治水安全度を超える洪水である超過洪水までを含めたあらゆる外力規模を考慮し、河道整備では防ぎきれない洪水被害をも対象とした治水政策の必要性が認識され始める。また、計算機の能力が向上し、従来は難しかった様々な条件での氾濫解析が可能となったことで、河川氾濫時の被害を詳細に検討することが可能となった。この背景から、特に欧州において、治水政策のパラダイムが河道での洪水防御から流域全体へのリスクの定量的把握へとシフトしつつある[23, 24, 25]。

水害リスクを確率的な側面を踏まえて定量的に把握・評価する手法としては、水害リスクカーブの算出が挙げられる。水害に限らない災害全般におけるリスクカーブの定義やその有用性を Kaplan らが提起し[26]、災害対策の分野においてリスクカーブに基づく政策決定や経済的妥当性評価への道筋が立てられた。ただし、水文学においては、降雨あるいは流出から被害額算出までの複雑なモデルの組み合わせが必要となり、その全体像は Apel et al. や Merz et al.により整理された[27, 28, 29]。水害リスク分析の全体像の概観図をに示す。

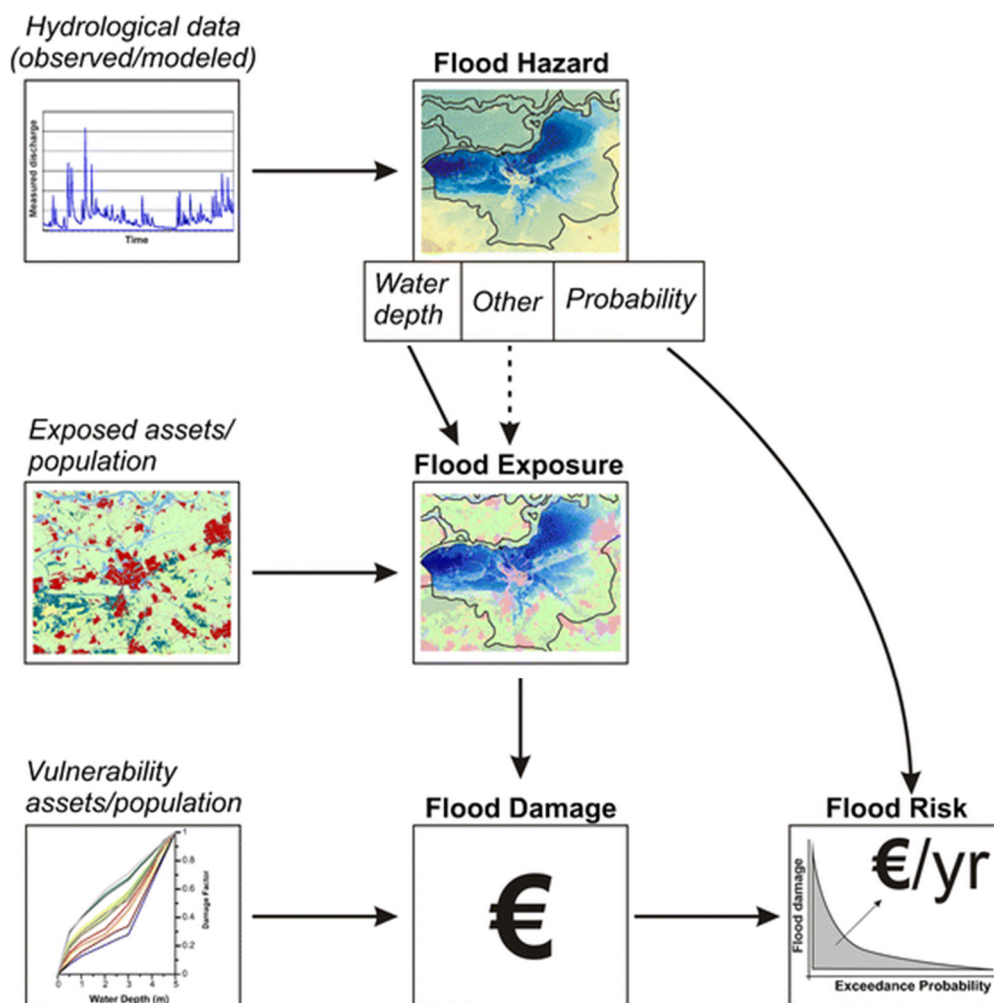


図 1-6 水害リスク分析の概観図[28, 29]

近年は、特定の対象領域について、降雨条件や土地利用条件などを変更した氾濫解析により、様々なシナリオでの水害リスクカーブを算出することで、対象領域の確率的リスク特性を議論する研究が多数行われている[16, 30, 31, 32]. また、特定の流域スケールでの流出・氾濫解析を一体化することによる計算負荷の軽減に関する研究も行われている[33]. しかしながら、未だに複数の領域に関する水害リスクカーブの算出と比較にまでは至っていない. この際に問題となる氾濫解析における計算量の多さへの対応として、氾濫解析を用いずに過去の洪水被害額等から回帰的に水害リスクカーブを算定する手法が考えられる. 平野らはこの考えに基づき、長期間の水害被害額統計に基づいた水害リスクカーブの算出手法である **Frequency-Damage 法 (FD 法)** を開発した[34]. FD 法は、過去の災害記録に基づいて災害リスクを回帰的に推定する手法であり、主に災害保険の分野において用いられていた考え方である. 氾濫解析を用いた手法と比較して計算量が小さいことから、複数の対象領域の水害リスクカーブを同一の基準で算出可能であるという利点があり、都道府県スケールを対象とした水害リスクカーブの算出とその比較が行われている[35, 36]. ただし、統計的な手法は主として降雨や洪水流量に関して行われており、被害額そのものを対象とし

た研究は稀である。

その他にも、水害リスクの計算過程においては、降雨モデル・流出モデル・洪水流モデル・氾濫モデルなどの多数のモデルと、降雨データ・土地利用データ・財産分布データ等の多数のデータを組み合わせる必要があるため、モデル選択・データ選択による不確実性が懸念される。これらの不確実性へのモデル選択・データ選択による影響評価も数多く行われている[37, 38, 39, 40, 41]。

### 1-3-2. 水害リスクの地域性に着目した研究の概観

前節における検討から、我が国の河川計画における水害リスク活用のさらなる可能性として、水系間など複数領域間での水害リスクの比較による確率的リスク特性の地域性の分析を指摘した。

水害リスクの地域性に着目した既往の研究としては、地球温暖化による洪水頻度の変化に着目した Hirabayashi et al. や Alfieri et al. において、長江などの大流域スケールや大陸スケールでの分析が行われている[2, 42, 43]。しかしながら、これらは現在気候における特定の再帰期間の出水と同程度の出水の、将来気候下における頻度と再帰期間の変化を検討した研究であり、本研究が着目する水害リスクについての検討は行っていない。より小さなスケールでの研究としては、Oudin et al. によるフランス全土の流域における降雨・出水特性の類似性に関する研究や、巖島らの我が国における流域特性と洪水流量の関係性の検討が挙げられるが[44, 45]、これらは洪水流量に関する検討であり、それによって引き起こされる被害額に関する地域性の検討までは踏み込んでいない。Thielen et al. では、水害により被害を受ける可能性がある財のドイツ国内での分布の地域性に着目した分析が行われているが、同様に実際の水害被害額の想定や確率的リスクとしての検討は行われていない[46]。

従って、確率的リスク特性に着目し、その地域性について検討した研究は、未だ見受けられない。

### 1-3-3. 水害リスクの地理的構造に着目した研究の概観

我が国の河川計画における水害リスク活用のさらなる可能性として、地先の確率的リスク情報を踏まえたリスクの地理的構造化を前節では指摘した。本項では、水害リスク情報の地理的分布やその地理的な構造に着目した既往研究を概観する。

既往の研究において、着目した領域の内部における詳細な水害リスク情報を求めようとする研究は複数行われてきた。しかしながら、水害リスク情報に含まれる確率的リスク特性と地理的構造の双方について着目した研究は見当たらない。

ある再帰年の出水のみに着目した被害額分布の詳細な記述を試みる分析は数多い[47, 48, 49]。例として Ernst et al. は 2m グリッドの超詳細 DEM データと実地調査に基づく浸水深被害額関数を用いた被害額分布マップを作成し、被害額分布の要因の検討を行っている[47]。また、Wang et al. は氾濫解析に基づく浸水深に加えて、想定される流速等の情報に



基づき、流域内の水害リスクの特徴の類型化を試みている[48]。多田らは流量を固定した場合の破堤地点の不確実性を考慮した浸水確率の流域内分布を示した新たなハザードマップを提案している[50]。これらの研究は水害リスクの地理的構造には着目している一方で、リスク自体の確率的側面を十分に考慮してはいない。すなわち、ある特定の外力規模に関する分析に留まり、各外力規模に応じた発生確率を含めた確率的リスク特性については分析対象に含めていない。

一方で、水害リスクの確率的側面に着目した研究として、各氾濫ブロックについて水害リスクカーブを算出・比較している研究[13, 51]が挙げられるが、地先スケールでの水害リスクの検討は行っておらず、また予め切り分けられた氾濫ブロックについて水害リスクカーブの算出を行っているのみであることから、確率的リスク特徴の地理的構造には着目していない。田中らは流域内部の地先スケールで水害リスクカーブを求め、複数点間での水害リスクカーブ形状の違いから確率的リスク特性の多様性を示しているものの、確率的リスク特徴の地理的構造に関しては分析されていない[31]。

以上の検討から、水害リスクの確率的情報と空間的情報の双方を踏まえたリスクの地理的分布の構造化という観点からの研究は、未だ行われていない。

#### 1-3-4. 本研究の新規性

前節においては、我が国の河川計画における水害リスク活用のさらなる可能性として、①水系間など複数領域間での水害リスクの比較による確率的リスク特性の地域性の分析、および②地先の確率的リスク情報を踏まえたリスクの地理的構造としての流域の構造化を提示した。①の試みを通じた全国的なリスクバランスの検討および地域ごとの総合的リスク対策の検討に、②の試みを通じたゾーニング等に基づく水害リスク管理手法の検討や都市計画・土地利用計画へのリスク情報の定量的な組み込みにつながると考えられる。

本節における既往研究の整理から、水害リスクの確率的リスク特性に関して、その地域性に関する検討は未だ行われておらず、①の試みは新規性を持つ。また、水害リスクの確率的側面と地先スケールでの地理的構造の双方に着目し、確率的リスク特性に基づいた地理的構造を明らかにしようとする試みも未だ行われておらず、②の試みもまた新規性を持つ。

#### 1-4. 本研究の目的と構成

本章でのこれまでの検討を踏まえ、本研究の目的を以下のように設定する。

- I. 面的な水害リスクカーブの領域間比較を通じた、水害の確率的リスク特性の地域性の検討
- II. 地先の水害リスクカーブとして表される確率的リスク特性に基づく、水害リスクの地理的構造としての把握手法の提案
- III. 水害リスクの地理的構造を成立させる自然的・社会的要因の分析

上述の3つの目的を通じて、面的・点的双方の水害リスク情報のさらなる活用可能性を提示するとともに、面的リスク情報の背後にあって見落とされてきた点的リスク情報への着目を促すことが、本研究全体のねらいである。

本研究の構成を図1-7に示す。

目的Iには第2章および第3章が対応する。第2章においては、全国109一級水系に関する水害リスクカーブを算出・比較することを通じて、流域スケールでの水害の確率的リスク特性の地域性・多様性を明らかにする。また第3章においては、市区町村スケールでの水害リスクカーブの算出・比較を行い、より小スケールでの水害の確率的リスク特性の地域性・多様性について検討を行う。

目的IIには第4章が対応する。この章においてはまず、反復氾濫解析により対象領域内部の各地先における水害リスクカーブ・水害ハザードカーブを算出する。その後、水害リスクカーブ・水害ハザードカーブの類似性に基づいた地理的構造化手法を提案し、点的な水害リスク情報の活用を試みる。

目的IIIには第5章が対応する。この章においては、第4章で示された水害リスクの地理的構造が成立した要因に関して、地形地質などの自然的要因や、流域の歴史的発展や治水事業の進展など社会的要因に基づいて検討・考察する。

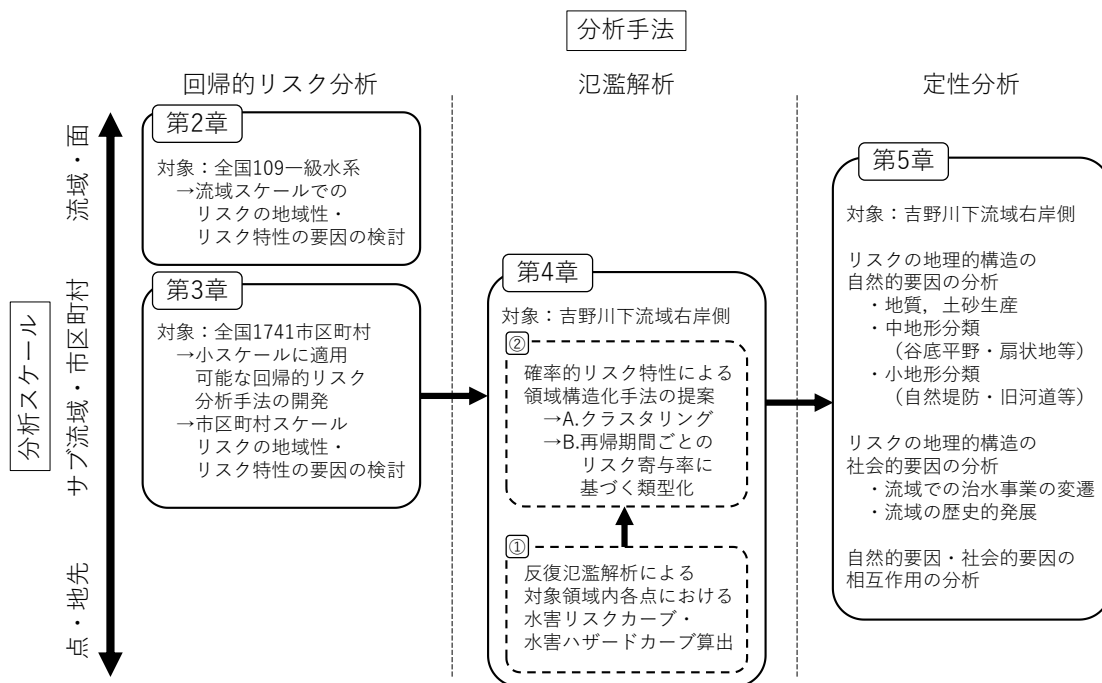


図 1-7 本研究の構成





## 第2章 全国一級水系の回帰的リスク分析

本章では、我が国の109一級水系を対象とした水害リスクカーブの作成と比較を通じて、確率的リスク特性の地域性の分析を行うことを目的とする。前章にて述べた通り、我が国の河川行政においては、水害リスクカーブの作成と利用は流域内部での治水事業効果の効果分析のみに用いられ、他の領域との比較には用いられていない。一方で、水系の流域ごとに地形地質や流出特性などの自然的条件、集住構造や土地利用などの社会的条件が異なることは既往研究においても指摘されており、確率的リスク特性についても流域間差異が存在し、また地域性が存在すると仮定することは妥当であると考えられる。

水害リスクカーブに着目した既往研究においても、検討対象領域は個別の流域あるいは地区に限られており、複数の領域について同一の基準で水害リスクカーブを作成し、その比較を試みた研究はない。我が国において、治水事業の計画・実施や効果評価は水系の流域を単位として行われることから、同一の基準から複数の対象領域の水害リスクカーブを比較し、地域ごとの確率的リスク特性を定量的に分析することは、各地域の水害リスク・治水目標のバランス検討や、各地域の確率的リスク特性にそぐうリスク軽減対策を議論する上で重要である。

第一節では、本章において用いる回帰的リスク分析手法である **Frequency-Damage 法 (FD 法)** および使用データについて詳述する。一般に水害リスクカーブを算出する際には、汎濫解析の計算負荷が大きな課題となる。本章では、多数の領域に対するリスクカーブ算出のために、建設省および国土交通省が作成している長期間被害額情報である水害統計を用いた回帰的手法である **FD 法** を採用することで、計算負荷の問題を克服している。第二節では、算出される多数のリスクカーブを定量的に解析するための手法を提案し、その内容について詳述する。リスクカーブが治水整備の効果を分析するために用いられ際は、同一の地区について、治水整備の前後の2本のリスクカーブについて、それぞれの年超過確率において想定被害額がどれだけ減少したかを算出するが、多くの領域についてそれぞれのリスクカーブを算出した場合は、リスクカーブの形状に表される確率的リスク特性を総合的に比較する必要がある。このため、本章では、各再帰期間の被害額期待値が、すべての再帰期間に関する被害額期待値、すなわちリスク想定値に対してどれだけ寄与しているかを定量的に示す分析手法を提案する。提案された指標により、リスクカーブの形状に示される確率的リスク特性が二次元平面上の一点にプロットされることとなり、多数のリスクカーブの比較が可能となる。第三節では、前節までで導入した **FD 法** 及びリスク寄与率に着目した分析手法により、全国109一級水系の水害リスクカーブを算出し、その確率的リスク特性と地域性について分析する。続いて第四節では、各地域の一級水系に特徴的な確率的リスク特性の要因について、各地域に特徴的な流域規模の自然的・社会的条件から考察する。

## 2-1. Frequency-Damage 法の概要

### 2-1-1. Frequency-Damage 法の基本式および手法の概観

Frequency-Damage 法，以下 FD 法は，水害リスクカーブの算出時に課題となる氾濫解析の計算負荷の大きさへの対応策として，平野ら[34]・大楽ら[35]により提案された手法である．この手法の基本的な考え方は，年間水害被害額を，年間罹災世帯数と，罹災世帯あたり平均被害額の積として表すというものである．

$$L = (N \times F) \times (E \times D) \quad \dots\dots \text{式(2-1)}$$

ただし， $L$ ：年間被害額， $N$ ：世帯数， $F$ ：罹災世帯率， $E$ ：1世帯あたり平均一般資産価値， $D$ ：罹災世帯の平均損傷率（一般資産総額に対する被害額の割合）である． $N \times F$ が年間の罹災世帯数を， $E \times D$ が該当年の罹災世帯 1 世帯あたり平均被害額を表している．

また，FD 法の概要図を図 2-1 に示す．

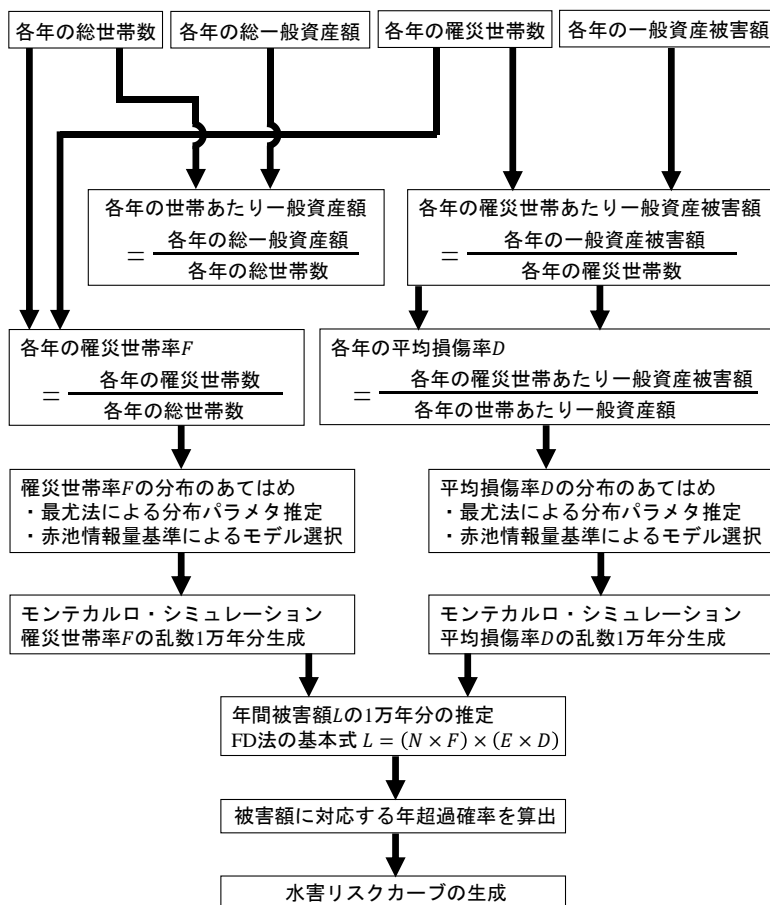


図 2-1 Frequency-Damage 法の概要 ([34]を筆者編集)

### 2-1-2. FD法に利用するデータの詳細

図2-1の最上部より、FD法のために必要となるデータは、各対象領域について、①対象期間の各年総世帯数、②各年総罹災世帯数、③各年総一般資産額、④各年総一般資産被害額である。これらの値は国勢調査等の公開統計資料のものを用いるが、該当の統計資料は市区町村単位で集計されているため、一級水系の流域を対象としている本章の分析においては、それぞれの一級水系の流域を単位としたものに換算する必要がある。各データの算出手法の詳細は以下のとおりである。

①各年の総世帯数：市区町村ごとの各年の世帯数は国勢調査に基づき、国勢調査が実施されない年については線形補間した。その後、ArcGISを用いて、一級水系の流域と各市区町村の領域が重なっている面積割合を市区町村ごとに算出し、その割合と均等に世帯数を流域に割り当てることで、各年の流域の総世帯数を算出した。

②各年の総一般資産額：市区町村ごとの各年の総一般資産額は、国土交通省の治水事業における費用便益分析の算出式を用い、家屋資産、家屋用品資産、事業所償却・在庫資産、農漁家償却・在庫資産、農作物資産の合計とした。それぞれの資産項目に関するデータ出典および算出方法を 表2-1 に示す。ただし、家屋資産・家庭用品資産額の算出では、浸水被害を受ける可能性があるのは建物の1-2階のみと仮定し、該当階の床面積と世帯数を用いている。また、農作物資産については、市区町村別の生産量・耕地面積に関する長期統計自体が存在しないため、2015年の値を各年の値として用いた。2015年以前の資産額は国土交通省の水害関係デフレーターにより2015年時点での価値に変換した。最後に、市区町村ごとに算出された各年の一般資産額を、世帯数と同様の方法で流域に割り当てた。

③各年の罹災世帯数および④各年の一般資産被害額：国土交通省発行の「水害統計」の一般資産等水害統計基本表から、水系ごとの各年の罹災世帯数と、外水もしくは内水を水害原因とする各年の一般資産被害額を算出した。一般資産被害額は、国土交通省の水害関係デフレーターを用いて2015年時点での価値に変換した。

上述の手順を、本章の分析では1980年～2015年の36年に関して行った。

表 2-1 一般資産の項目別算出方法およびデータ出典

家屋資産	算出式：建物階別床面積（1-2階）× 県別評価単価
	データ出典 建物階別床面積：国勢調査 県別評価単価：治水経済評価マニュアル
家屋用品資産	算出式：建物階別世帯数(1-2階)× 世帯あたり評価単価
	データ出典 建物階別床面積：国勢調査 県別評価単価：治水経済評価マニュアル
事業所償却・在庫資産	算出式：産業別従業者数× 産業別一人あたり評価単価
	データ出典 産業別従業者数：国勢調査・工業統計・商業統計 産業別一人あたり評価単価：治水経済マニュアル
農漁家償却・在庫資産	算出式：農漁家世帯数× 一世帯あたり評価単価
	データ出典 農漁家世帯数：国勢調査 一世帯あたり評価単価：治水経済マニュアル
農作物資産	算出式：作物別生産量× 作物別単価
	データ出典 作物別生産量：作物統計，東京都農業センサス 作物別単価：治水経済マニュアル，農業物価統計

### 2-1-3. 罹災世帯率・平均損傷率の確率分布推定

上記の①から④の値に基づいて、図 2-1 に示す式に従い、流域ごとの各年の罹災世帯率 $F$ と平均損傷率 $D$ をそれぞれ算出し、罹災世帯率 $F$ ・平均損傷率 $D$ に対して、一般的な連続確率分布（対数正規分布・ワイブル分布・ガンベル分布・指数分布・ガンマ分布・ジョンソン SU 分布）のパラメタ推定を最尤法で行い、各確率分布の当てはめを行った。その後、推定されたパラメタを持つ各確率分布に関して水害統計から求めたデータセットに関する赤池情報量基準 AIC を算出し、AIC が最小となる確率分布を、罹災世帯率 $F$ と平均損傷率 $D$ それぞれの確率分布関数として採用した。

### 2-1-4. モンテカルロ法による水害リスクカーブの算出

採用した確率分布に従い、モンテカルロ法から 1 万年分の罹災世帯率 $F$ と平均損傷率 $D$ を生成した。ただし、乱数発生時に平均損傷率 $D$ が 1 を上回る仮想年が生じた場合、罹災世帯が有する一般資産額を超えた被害額は生じ得ないため、それらの仮想年の平均損傷率は 1 に修正した。例として、阿武隈川水系における世帯罹災率 $F$ を図 2-2 に、平均損傷率 $D$ を図 2-3 に示す。過去の水害記録データにおける罹災世帯率 $F$ および平均損傷率 $D$ の分布形を概ね再現していることがわかる。その後、式(2-1)を用いて 1 万年分の年間被害額 $L$ を算出した。な

お、式(1)を用いて年間被害額 $L$ を算出する際には、世帯数 $N$ および1世帯あたり平均資産価値 $E$ は、各流域における2015年の値を用いている。この1万年分の年間被害額 $L$ から、各被害額に対応する年超過確率を求め、水害リスクカーブを生成した。

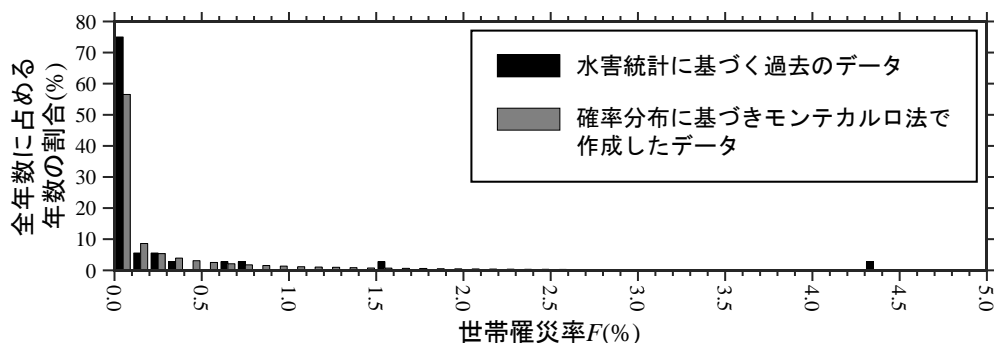


図 2-2 阿武隈川水系における世帯罹災率 $F$

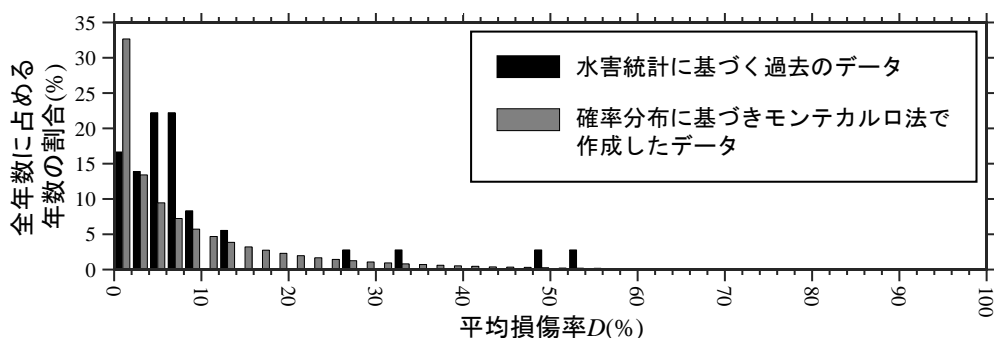


図 2-3 阿武隈川水系における平均損傷率 $D$

### 2-1-5. 水害統計の詳細と水系単位の集計データの特徴

水害統計における一級水系の外水被害には、その原因となる河川には準用河川・普通河川が含まれ、浸水形態も無堤溢水・有堤越水・破堤が含まれる。一方で内水被害には、農業水路や下水道、窪地等、様々な要因が含まれる。本研究においては、法定河川やその他の小河川群、農業用水路、下水道網などの流域の構成要素を個別に切り離さず、流域の全体を対象として、外水と内水の双方を含んだ内外水一体の分析を行っている。

また、各水系の世帯罹災率 $F$ や平均損傷率 $D$ の頻度分布は、図 2-2 や図 2-3 のように右裾が長い単峰型となる傾向を示す。この要因として、様々な形態の浸水被害が外水・内水のそれぞれに含まれるため、各水系において必ずしも外水の被害規模が内水に比べて大きいとは限らないことや、大規模な被害が生じた年が頻度分布において右裾に位置するケースが多いことが考えられる。

### 2-1-6. FD法による分析結果

我が国の109一級水系を対象としたFD法による水害リスクカーブの算出結果を図2-4に示す。このように多くの水害リスクカーブについて、目視による比較分析は難しく、何らかの指標が必要となる。次節において多数の水害リスクカーブを比較分析するための指標を導入し、その次の節において、導入された指標を用いて図2-4の水害リスクカーブ群を再度分析する。

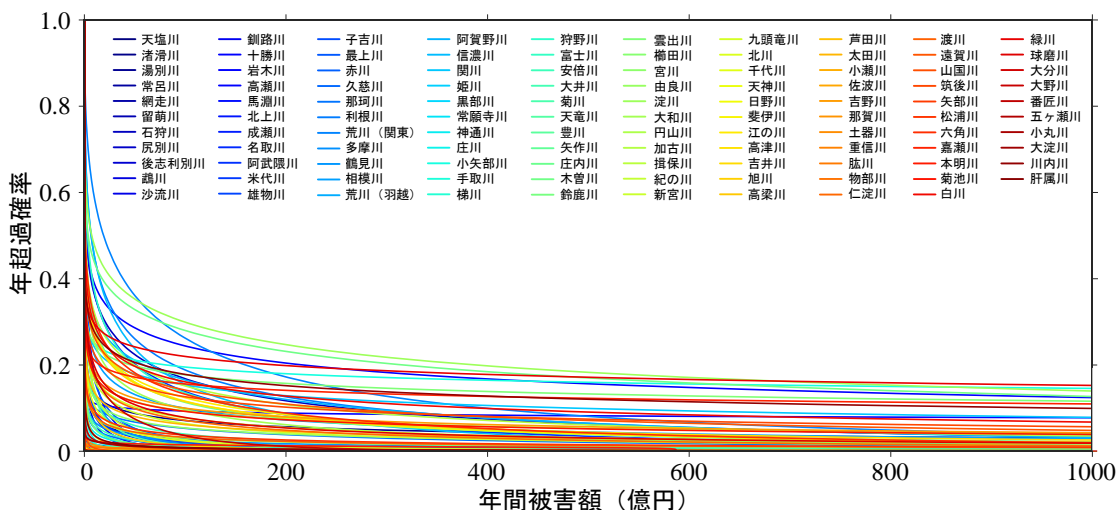


図 2-4 FD法で求めた全国109一級水系の水害リスクカーブ

## 2-2. 確率的リスク特性の分析手法の導入

前述のとおり、本章の分析のように対象領域が多数である場合、算出される水害リスクカーブの本数も多数となるが、大量のリスクカーブ群を目視で比較検討することは現実的ではない。したがって、リスクカーブの形状に表される確率的なリスク特性をより分析可能な形に落とし込む、何らかの指標が必要となる。本研究では、確率的リスク特性の中でも、「どのような再帰期間の被害が水害リスク評価値、すなわち全再帰期間に関する被害額期待値にどれほど寄与しているのか」に着目し、「再帰期間ごとのリスク寄与率」という指標を定義・導入する。

### 2-2-1. 「再帰期間ごとのリスク寄与率」指標の定義

分析対象の年超過確率について、年間被害額の再帰期間を10年未満、10年以上50年未満、50年以上100年未満の3つに区分する。本分析では1980年～2015年の36年に関する水害統計を用いているという制限から、ごく低頻度の事象については年超過確率と年間被害額の関係の正確性が十分に担保されないため、再帰期間100年以上の被害額について

は分析対象から除外した。この時、それぞれの再帰期間に対応する被害額期待値が、すべての再帰期間に対応する被害額期待値である総リスク評価値へどれだけ寄与するかを表す、再帰期間ごとのリスク寄与率指標を導入する。

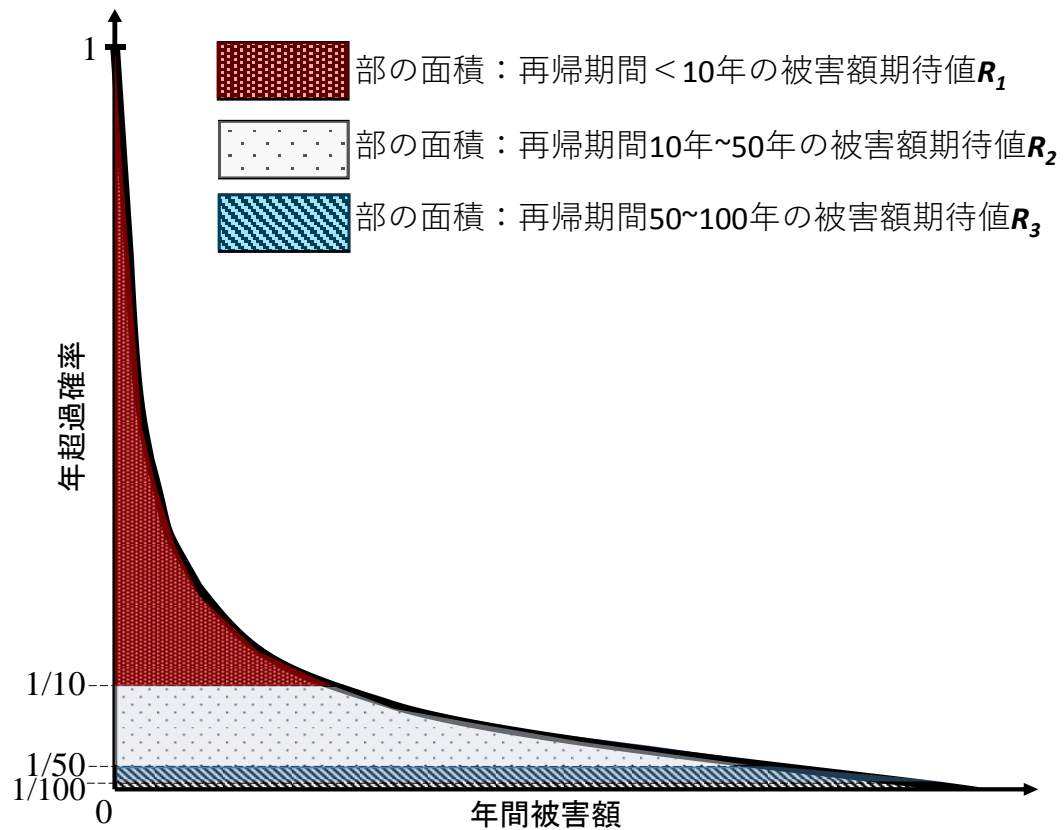


図 2-5 各再帰期間に対応する被害額期待値

図 2-5 に水害リスクカーブの例を示す。縦軸の年超過確率が 1 から 1/10 に対応する赤色の領域の面積は、「再帰期間が 10 年以下の高頻度小被害年の被害額期待値 $R_1$ 」と等しい。同様に、縦軸が年超過確率の 1/10 から 1/50 に対応する灰色の領域の面積は、「再帰期間が 10 年以上 50 年未満の中頻度中被害年の被害額期待値 $R_2$ 」と等しく、年超過確率が 1/50 から 1/100 に対応する青色の領域の面積は、「再帰期間が 50 年以上 100 年未満の低頻度大被害年の被害額期待値 $R_3$ 」と等しい。また、年超過確率が 1 から 1/100 に対応する、赤色・灰色・青色の領域の面積の総和は、「(本章において分析対象とする) 再帰期間 100 年以下のあらゆる再帰期間に関する被害額期待値」と等しく、 $R_1 + R_2 + R_3$  として表される。ここで、分析対象の年超過確率を 1/100 以上に限定するのは、本章の分析に利用する水害統計のデータ年数が 36 年と比較的少数であり、当てはめられた確率分布のテール部の精度についてはその検証が難しいため、きわめて大きな再帰期間を持つ大きな被害額の仮想年については、その妥当性が保証できないからである。

このとき、「再帰期間 100 年以下のあらゆる再帰期間に関する被害額期待値 $R_1 + R_2 + R_3$ 」



に、「再帰期間 10 年以下の年度に関する被害額期待値 $R_1$ 」がどれだけ寄与しているかは、「高頻度低被害年のリスク寄与率 $X$ 」として、 $X = R_1 / (R_1 + R_2 + R_3)$ と算出できる。同様に、「再帰期間 100 年以下のあらゆる年度に関する被害額期待値 $R_1 + R_2 + R_3$ 」に、「再帰期間 10 年以上 50 年以下の年度に関する被害額期待値 $R_2$ 」がどれだけ寄与しているかを表す指標を、「中頻度中被害年のリスク寄与率 $Y$ 」として、 $Y = R_2 / (R_1 + R_2 + R_3)$ と定義でき、「再帰期間 100 年以下のあらゆる年度に関する被害額期待値 $R_1 + R_2 + R_3$ 」に、「再帰期間 50 年以上 100 年以下の年度に関する被害額期待値 $R_3$ 」がどれだけ寄与しているかを表す指標を、「低頻度大被害年のリスク寄与率 $Z$ 」として、 $Z = R_3 / (R_1 + R_2 + R_3)$ と定義する。このとき、 $X + Y + Z = 1$ となるため、一本の水害リスクカーブが、図 2-6 に示された第一象限の $Y \leq 1 - X$ の三角形領域に1つの点としてプロットされることとなる。

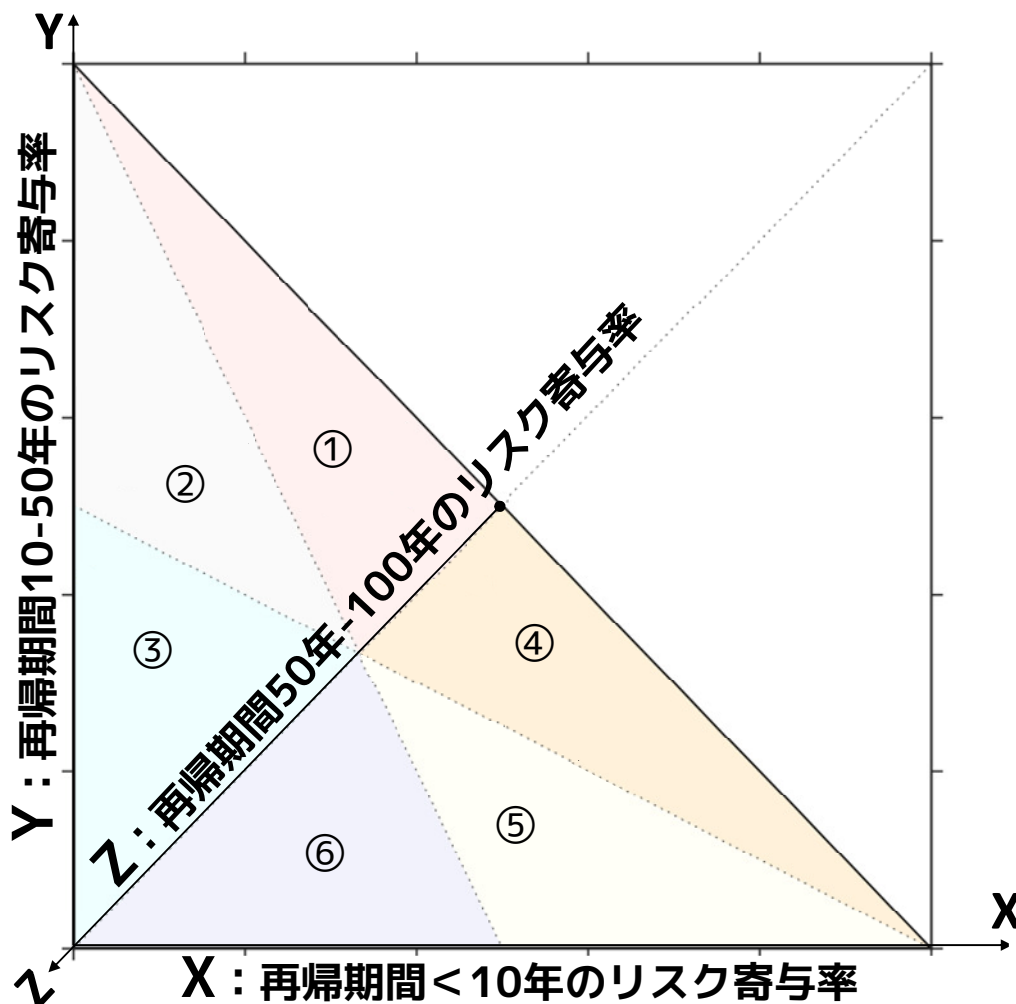


図 2-6 再帰期間ごとのリスク寄与率に基づくプロット領域

さらに、この三角形領域は、 $X, Y, Z$ の大小関係から、図 2-6 の①から⑥の6つの小領域に分割される。各小領域に関して、成立する $X, Y, Z$ の大小関係は表 2-2 の通りである。

小領域番号	大小関係	説明
①	$Y > X > Z$	再帰期間が10年から50年の中頻度中被害年のリスク寄与率が最も大きく、一方で、再帰期間が50年から100年の低頻度大被害年のリスク寄与率は最も小さい領域。
②	$Y > Z > X$	再帰期間が10年から50年の中頻度中被害年のリスク寄与率が最も大きく、一方で、再帰期間が10年未満の高頻度小被害年のリスク寄与率は最も小さい領域。
③	$Z > Y > X$	再帰期間が50年から100年の低頻度大被害年のリスク寄与率が最も大きく、一方で、再帰期間が10年未満の高頻度小被害年のリスク寄与率は最も小さい領域。
④	$X > Y > Z$	再帰期間が10年未満の高頻度小被害年のリスク寄与率が最も大きく、一方で、再帰期間が50年から100年の低頻度大被害年のリスク寄与率は最も小さい領域。
⑤	$X > Z > Y$	再帰期間が10年未満の高頻度小被害年のリスク寄与率が最も大きく、一方で、再帰期間が10年から50年の中頻度中被害年のリスク寄与率は最も小さい領域。
⑥	$Z > X > Y$	再帰期間が50年から100年の低頻度大被害年のリスク寄与率が最も大きく、一方で、再帰期間が10年から50年の中頻度中被害年のリスク寄与率は最も小さい領域。

表 2-2 各小領域における再帰期間ごとのリスク寄与率の関係

この小領域のうちどの領域内にプロットされるかを基準として、水害リスクカーブの確率的リスク特徴を類型化することができ、多数のリスクカーブの確率的リスク特徴を定量的に比較することが可能となる。

### 2-3. 再帰期間ごとのリスク寄与率を用いた 一級水系の確率的リスク特性の分析

前節で導入した再帰期間ごとのリスク寄与率を用いて109一級水系のリスクカーブをプロットしたものを図2-7に示す。1つのマーカーが1つの水系に対応し、また指標の値の大小順序が同一の小領域を背景色で示した。マーカーが3つの領域に存在していることから、被害額期待値への再帰期間ごとのリスク寄与率に着目すると、全国の一級水系は3類型に分類できることがわかる。各類型に含まれる水系名を表2-3に示す。なお、各水系名に続く値は、集計期間中にその水系において水害による一般資産被害が記録された年数である。また、各類型の水系群の地図上での位置を図2-8に、各類型に含まれる水系の水害リスクカーブの代表例を図2-9に示した。

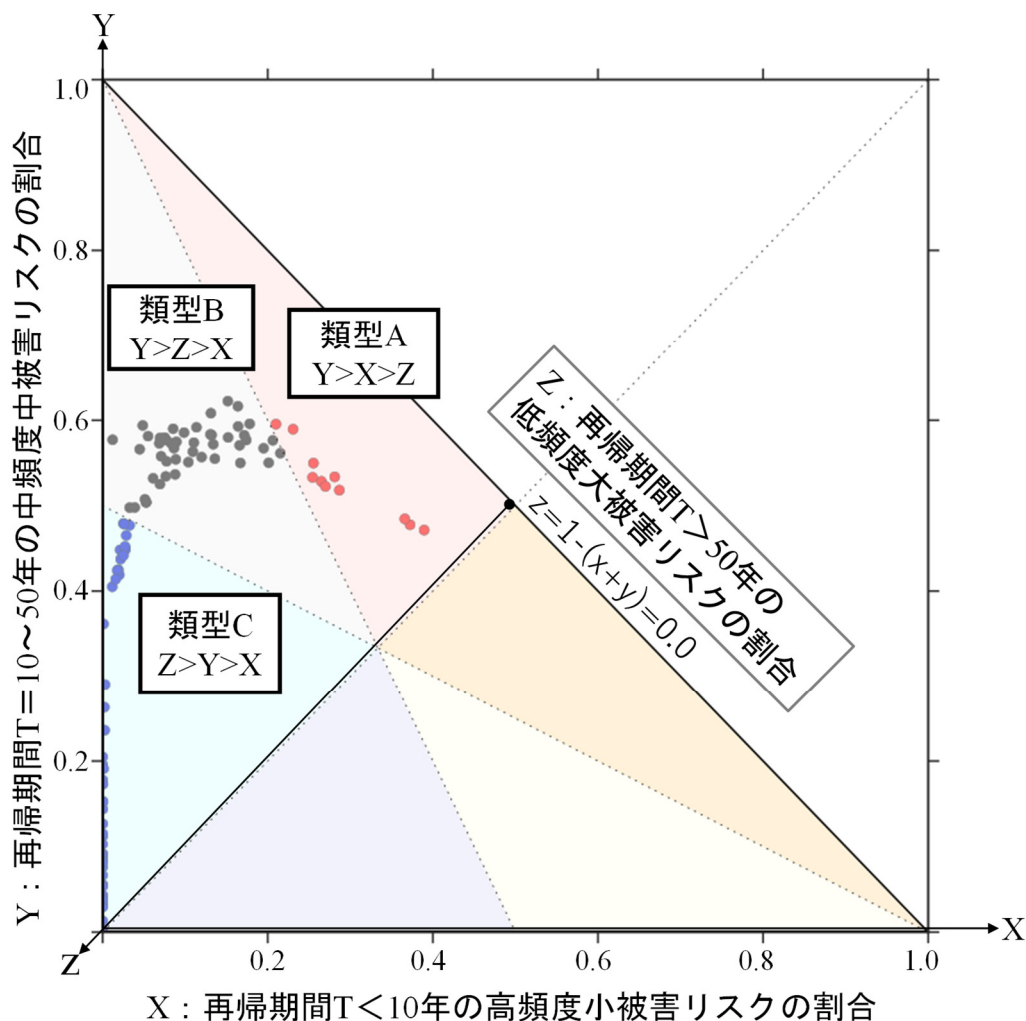


図 2-7 一級水系 109 流域に関する再帰期間ごとのリスク寄与率プロット

<p>類型A 計11水系</p>	<p>阿武隈川(34),北上川(34),最上川(30),利根川(35),荒川(関東)(33),多摩川(34),富士川(30),阿賀野川(25),信濃川(35),天竜川(33),大野川(16)</p>
<p>類型B 計48水系</p>	<p>天塩川(14),留萌川(6),石狩川(26),尻別川(9),後志利別川(7),沙流川(3),釧路川(14),渚滑川(7),名取川(15),鳴瀬川(18),岩木川(27),雄物川(24),子吉川(22),赤川(12),那珂川(27),相模川(27),姫川(7),常願寺川(8),神通川(18),庄川(12),狩野川(24),安倍川(12),大井川(7),庄内川(32),木曾川(30),鈴鹿川(16),櫛田川(8),新宮川(19),紀の川(25),大和川(30),淀川(35),加古川(24),九頭竜川(21),北川(8),千代川(14),斐伊川(28),江の川(26),高梁川(26),旭川(29),吉井川(22),仁淀川(19),物部川(2),遠賀川(24),六角川(25),白川(15),球磨川(25),肝属川(20),山国川(14)</p>
<p>類型C 計50水系</p>	<p>鶴川(4),十勝川(17),網走川(5),常呂川(7),湧別川(5),馬淵川(17),高瀬川(10),米代川(21),久慈川(21),鶴見川(23),荒川(羽越)(7),関川(20),黒部川(4),小矢部川(19),手取川(6),梯川(10),菊川(8),豊川(12),矢作川(20),雲出川(14),宮川(20),揖保川(15),由良川(21),円山川(18),天神川(11),日野川(7),高津川(15),佐波川(9),小瀬川(7),太田川(26),芦田川(13),重信川(19),肱川(17),渡川(17),那賀川(14),吉野川(24),土器川(6),松浦川(13),本明川(10),嘉瀬川(20),筑後川(30),矢部川(17),菊池川(17),緑川(23),川内川(23),大淀川(25),小丸川(7),五ヶ瀬川(14),番匠川(14),大分川(11)</p>

表 2-3 再帰期間ごとのリスク寄与率に基づく一級水系の類型化

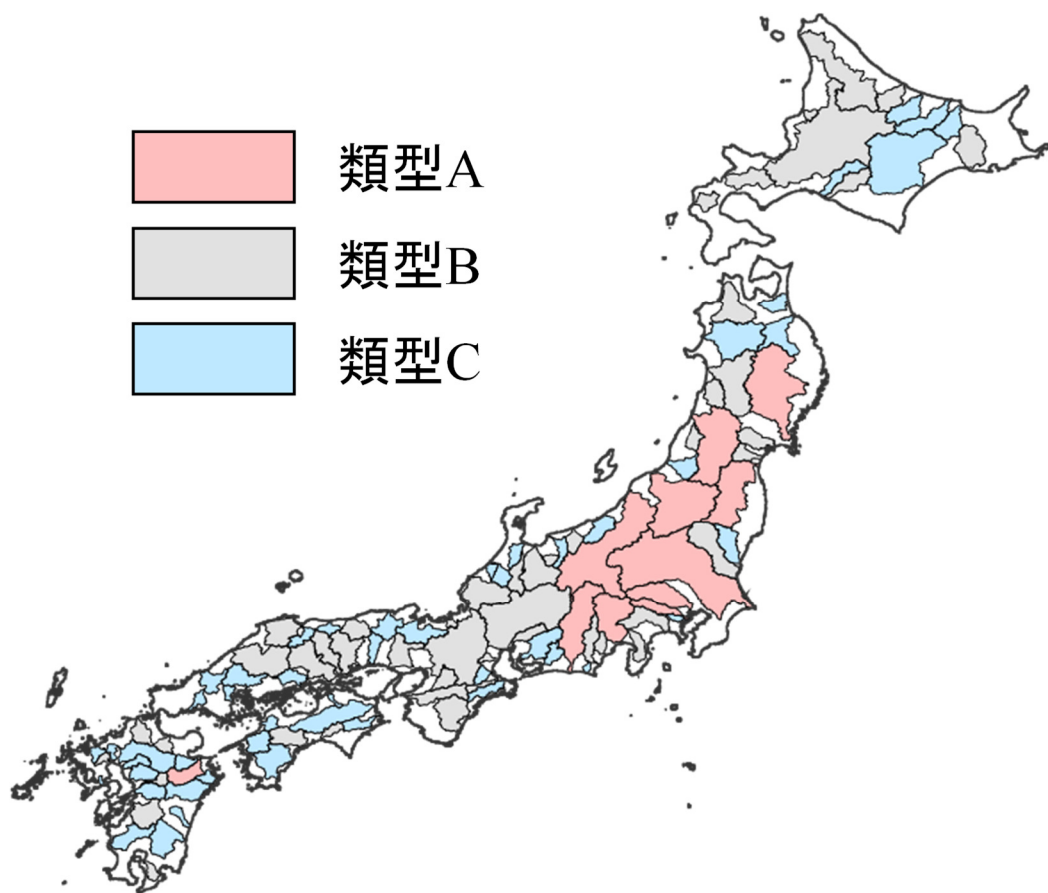


図 2-8 再帰期間ごとのリスク寄与率に基づく一級水系の類型分類地図

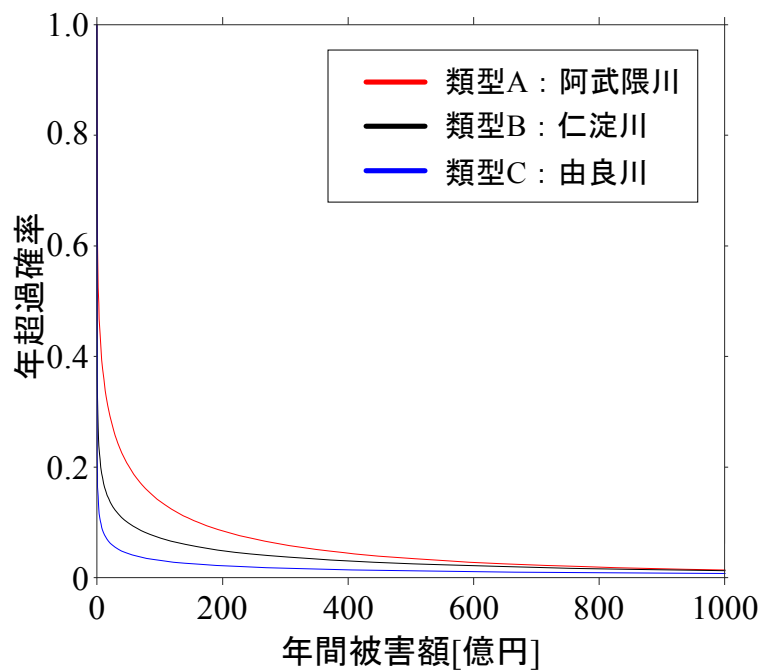


図 2-9 各類型に属する水系の水害リスクカーブ例

### 2-3-1. 一級水系の確率的リスク特性の多様性

図 2-7 において赤色で示した小領域では、 $Y > X > Z$ の大小関係が成り立つ。すなわち、この領域にプロットされた水系群である類型 A では、再帰期間 50 年以上 100 年以下の低頻度大被害年のリスク寄与率が最も小さく、それよりも再帰期間が小さい中頻度中被害年や高頻度低被害年がリスク要因となっている。一方で、図 2-7 において青色で示した小領域においては、 $Z > Y > X$ の大小関係が成り立ち、この領域にプロットされた水系群である類型 C では、再帰期間 50 年以上 100 年以下の低頻度大被害年のリスク寄与率が最も大きく、リスク要因となっていることがわかる。また、2 つの領域に挟まれた灰色の領域では、 $Y > Z > X$ の大小関係が成り立つが、この領域については類型 A と類型 C の中間領域という性質が強い。このように、我が国の一級水系の確率的リスク特性は、再帰期間ごとのリスク寄与率に着目した場合、対照的な性質を示す類型が存在し、多様であることが示唆される。

また、図 2-9 に示された、各類型に関して代表的な水系の水害リスクカーブから、水害リスクカーブの形状が、確率的リスク特性と対応していることも読み取れる。例として、類型 A に属する阿武隈川の水害リスクカーブ（赤色）は、年超過確率が比較的大きいうちから想定被害額がゆるやかに増大し始めることが読み取れる。一方で、類型 C に属する由良川の水害リスクカーブ（水色）は、年超過確率がより小さくなってから、想定被害額が急激に増大し始めるという特徴を示している。このように、各類型に属する水系の水害リスクカーブは、その形状がリスク寄与率による分析で示唆されたリスク主要因と対応した形状を示すことが理解される。

### 2-3-2. 一級水系の確率的リスク特性の地域性

各類型に属する水系の流域について色分けした日本地図である図 2-8 から、各類型に属する水系の地域的分布には偏りがあることがわかる。類型 A に属する水系の赤色で示された流域は関東から東北に集中している一方で、類型 C に属する水系の青色で示された流域は、西南日本や東北海道、あるいは比較的小さな流域に偏っていることがわかる。この図から、水系の確率的リスク特性については、地域ごとに偏りがあり、一級水系スケールでの確率的リスク特性には地域性が存在することが示唆される。本項では、類型 A・類型 C の水害リスク特性について分析するとともに、その特性が生じる理由について、流域の自然条件・社会条件から考察する。

類型 A には 11 水系が含まれ、低頻度大被害年の寄与率が最も小さく、一方で中頻度中被害年の寄与率が最も大きいことが特徴である。図 2-9 における阿武隈川の水害リスクカーブに見られるように、類型 A に含まれる水系の水害リスクカーブは、年超過確率が 0.6~0.4 を下回った付近から年間被害額が増大し始める。

九州地方の大野川のみ例外的だが、この類型の水系はフォッサマグナ帯・関東地方および東北地方に偏って存在している。フォッサマグナ帯から東北地方南部においては、大規模な平野や盆地が発達し、人口や資産が集中するという地域的特徴がある[52, 53]。流域内部に含まれるこれらの平野や盆地において小規模な水害罹災が頻繁に生じ、大きい年超過確率

に対応する年間被害額が大きくなることや、流域面積が大きく流域内において水害が生じる頻度が高くなることなどが、類型 A の水系において、低頻度大被害年の寄与率に比べて中頻度中被害年・高頻度小被害年の寄与率が高いという水害リスク特性を示す要因として考えられる。

一方で、類型 C には 50 水系が含まれ、高頻度小被害年の寄与率が最も小さく、一方で低頻度大被害年の寄与率が最も大きいことが特徴である。図 2-9 における由良川の水害リスクカーブに見られるように、類型 C に含まれる水系の水害リスクカーブは、年超過確率が 0.1 を下回った付近から、年間被害額が急激に増大する形状をとる。図 2-8 からは、これらの水系が全国的に分布してはいるものの、四国九州地方や北海道東部に集中していることがわかる。また、本州において、流域規模が小さい水系にこの類型が多く見られる。

小規模な流域は類型 A とは対照的に、毎年どこかで水害が起こるということは無く、雨域と流域が一致したときに大規模な被害が生じやすいという特徴を反映していると考えられる。流域の地理的な規模自体に地域的な地理的特性が関係していたと考えられる関東・南東北地方とは異なり、流域が小規模である要因は地域により異なると考えられる。

類型 C に属する水系が多くまとまっている地域としては、九州・四国地方が挙げられる。四国九州地方の水系については、図 2-10 に読み取れるように、平均年間降水量が他の地方の水系に比して大きい傾向にある。降水の大部分を夏季から秋季の降雨であり、特に台風によるものが顕著である。台風上陸数・接近数を地方ごとに比較した図 2-11 からも、災害外力の頻度自体が多いという地域的な特徴があることが読み取れる。したがって、数年に一回規模の降雨についてはある程度の順応・対策がなされ、被害が生じづらい一方で、一定規模以上の豪雨により大きな被害が生じる水害リスク特性を示していると考えられる。

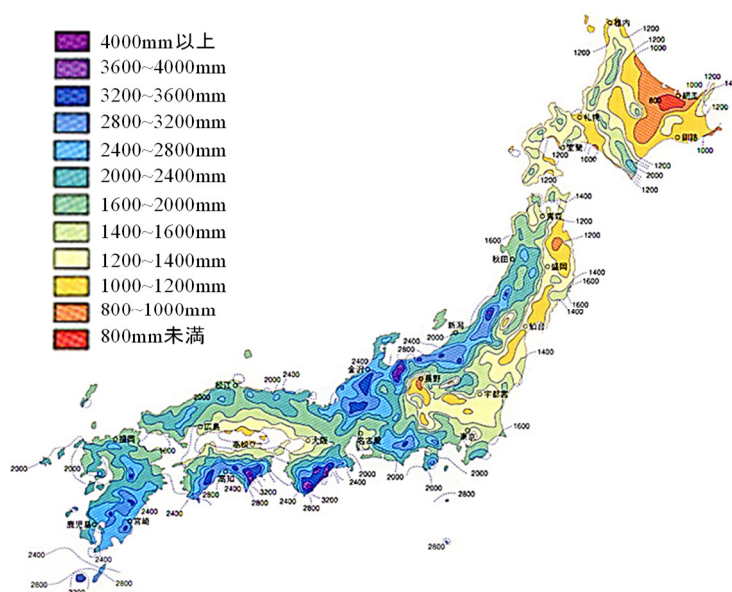


図 2-10 日本全国の平均年間降水量分布[54]

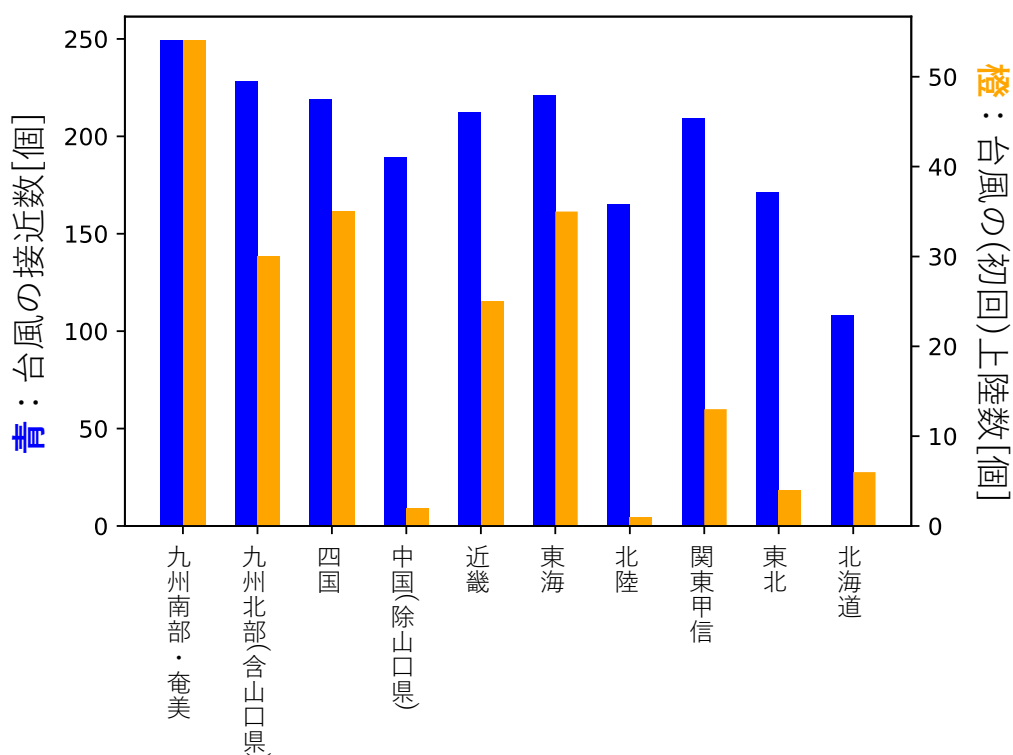


図 2-11 各地方の台風接近数と上陸数 (1951 年～2017 年) <sup>1</sup>

一方で、北海道東部の水系については、図 2-10 から読み取れるように、年間降水量が他の地方に比して最も小さい傾向にある。また、図 2-11 にあるように、台風の接近数・上陸数は他地方に比べて小さく、平年において浸水被害等につながる降雨事象は稀である。このため小さな被害額に対応する再帰期間が大きくなり、年超過確率が小さくなる。一方で、対象期間内に稀な大きな出水があると、大きな被害が生じる年により、小さな年超過確率では他の類型の水系と同様の年間被害額が記録されることとなる。これらの要因により、低頻度大被害年の寄与率が最も大きくなる水害リスク特性が生じると考えられる。

<sup>1</sup> 台風の接近数は気象庁[55]、台風の上陸数は北本[56]に基づく。なお、台風の接近とは、それぞれの地域のいずれかの気象官署から 300km 以内に台風の中心が入ることとして気象庁により定義されている[55]。また、各地域に含まれる都道府県は、北海道：北海道、東北：青森県・秋田県・岩手県・山形県・宮城県・福島県、関東甲信：東京都・栃木県・群馬県・埼玉県・茨城県・千葉県・神奈川県・長野県・山梨県、東海：静岡県・岐阜県・三重県・愛知県、北陸：新潟県・富山県・石川県・福井県、近畿：京都府・大阪府・兵庫県・奈良県・滋賀県・和歌山県、中国地方(除山口県)：鳥取県・島根県・岡山県・広島県、中国地方：香川県・愛媛県・徳島県・高知県、九州北部地方(含山口県)：山口県・福岡県・大分県・佐賀県・熊本県・長崎県、九州南部・奄美：宮崎県・鹿児島県、である。この地域区分は気象庁が気象情報において用いている区分をそのまま使用している[57]。

## 2-4. 第2章のまとめ

本章では、FD法により算出した水系ごとの水害リスクカーブについて、被害額期待値への再帰期間ごとのリスク寄与度という指標を導入した分析から、確率的リスク特性の水系間の相違や地域性を明らかにすることを目指した。結果を以下にまとめる。

### ・水害リスク特性の水系間の相違について

年間被害額を再帰期間10年未満の高頻度小被害年、10年以上50年未満の中頻度中被害年、50年以上100年未満低頻度大被害年の3つに区分し、それぞれの区分がリスク評価値である被害額期待値に寄与する割合に着目して分析を行った。その結果、我が国の一級水系には、低頻度大被害年の寄与率が最も小さく、高頻度小被害年や中頻度中被害年の寄与率が大きい水系と、高頻度小被害年の寄与率が最も小さく、低頻度大被害年の寄与率が最も大きい水系の双方が存在することを、同一の基準に基づいたリスク分析により定量的に明らかにした。

### ・水害リスク特性の地域性について

再帰期間区分ごとの被害額期待値への寄与割合に着目した水系の各類型について、同一地域の水系は同じ類型に属する傾向があることを指摘した。すなわち、水害リスクの確率的特性には地域性が存在することを明らかにした。

一方で、水害リスクカーブの分析から直接明らかになる水害リスク特性は、あくまでも年間被害額とその被害が生じる確率の関係の特性である。特定の再帰期間の災害外力に対して、具体的にどのようなメカニズムでどのような水害が発生し被害額が決定されるのかについては、各水系の自然条件・社会条件を考慮した考察を通じて明らかにする必要がある。本研究では、地形・流域規模・降雨等の自然条件と、流域人口や流域内資産という社会条件に着目した概略的な分析を通じ、水害リスクカーブから求めた水害リスク特性と、各水系の諸条件との関係性について、地域ごとに考察を行った。

その結果、四国・九州と北海道東部の2地域について、水害リスクカーブから導かれる水害リスクの確率的特性は同様の傾向を示す一方で、その確率的特性を成立させる流域の自然条件・社会条件およびメカニズムについては地域ごとに異なり、一通りではないことがわかった。この知見は、水害リスク情報の活用を試みる際には、被害額と発生確率の間の単なる関係式としてリスクを捉えるのではなく、その関係式が現れるメカニズムまで念頭に置く必要性を示唆するものである。





## 第3章 市区町村スケールの回帰的リスク分析と改良FD法の提案

本章では、我が国に2018年6月時点で存在する1741市区町村を対象とした水害リスクカーブの作成と比較を通じて、市区町村スケールでの確率的リスク特性の検討を行うことを目的とする。第1章にて整理したように、我が国の河川行政における確率的リスクの活用は、各水系の流域内部での治水事業効果の分析のみに限られ、他の領域との比較には用いられていない。また、水害リスクカーブに着目した既往研究においても、検討対象領域は個別の流域、あるいは地区に限られており、複数の領域について同一の基準で水害リスクカーブを作成し、それらの比較から確率的リスク特性を論じたものはない。本論文の第2章では我が国の109一級水系を対象とした水害リスクカーブの作成と比較を通じた確率的リスク特性の地域性の検討を行ったが、より小規模な領域として、本章では市区町村に着目する。事前防災や災害対応において市区町村は重要なアクターであり、市区町村単位での地先の水害リスクを評価することも重要である。

本章第1節では、第2章でも用いた従来のFrequency-Damage法（以下旧FD法）を、市区町村規模の小スケールの領域に適用する際に生じる問題について整理し、その問題を克服する手法として、新たに改良Frequency-Damage法（改良FD法）を提案する。本章第2節では、改良FD法と旧FD法の双方を用いて市区町村スケールの水害リスクカーブを算出し、改良FD法が旧FD法に比べ、対象領域の確率的リスク特性を精度良く反映しており、小スケールへの領域への適用性が向上していることを示す。本章第3節では、全国の市区町村を対象に、確率的リスク特性を再帰期間ごとのリスク寄与率の観点から分析し、その多様性について検討する。

### 3-1. 改良Frequency-Damage法の提案

#### 3-1-1. 従来のFrequency-Damage法の概要

前章で導入したFrequency-Damage法、以下FD法は、水害リスクカーブの算出時に課題となる氾濫解析の計算負荷の大きさへの対応策として、平野ら[34]・大楽ら[35]により提案された手法である。この手法の基本的な考え方は、年間水害被害額を、年間罹災世帯数と、罹災世帯当たり平均被害額の積として表すというものである。

$$L = (N \times F) \times (E \times D) \quad \dots\dots \text{式(3-1)}$$

ただし、 $L$ ：年間被害額、 $N$ ：領域内の総世帯数、 $F$ ：罹災世帯率、 $E$ ：一世帯当たり平均資産価値、 $D$ ：罹災世帯の平均損傷率（一般資産総額に対する被害額の割合）である。 $N \times F$ が年間の罹災世帯数を、 $E \times D$ が該当年の罹災世帯1世帯当たりの平均被害額を表している。また、FD法の概要図を再掲する。

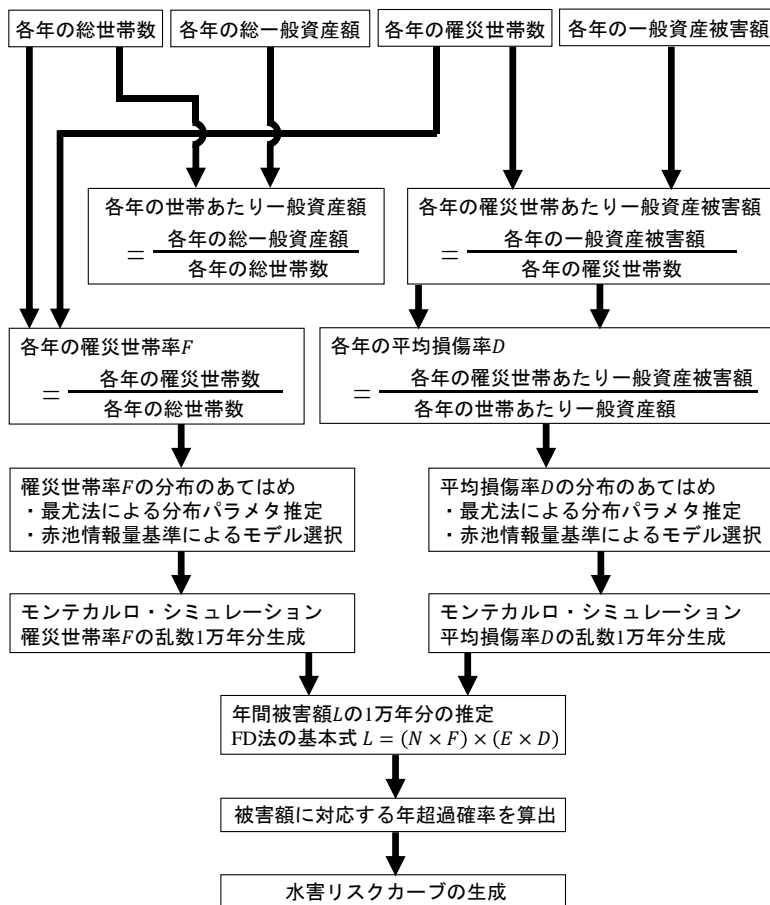


図 3-1 Frequency-Damage 法の概要 ([34]を筆者編集)

ここで、各年の罹災世帯率 $F$ は、図 3-1 に示した通り、各年の罹災世帯数を、その年の総世帯数で除して算出した。また、平均損傷率 $D$ は、各年の罹災世帯あたり一般資産被害額を、その年の世帯あたり一般資産額で除して算出した。なお、罹災世帯あたり一般資産被害額は、各年の一般資産被害額を、各年の罹災世帯数で除することで算出し、世帯あたり一般資産額は、各年の総一般資産額をその年の総世帯数で除することで算出している。すべての値は国土交通省公表の水害関係デフレータに基づき、2015年時点での価値に変換した。

各年の罹災世帯数・一般資産被害額は、国土交通省より発行されている「水害統計」の値を用いた。また、各年の総一般資産額は、国土交通省の治水事業における費用便益分析と同様[58]に、家屋資産、家屋用品資産、事業所償却・在庫資産、農漁家償却・在庫資産、農作物資産の合計とした。各資産の算出方法を表-1 にまとめた。家屋資産・家庭用品資産額の算出においては、被害を受ける可能性があるのは建物の1階と2階のみと仮定し、該当階の床面積と世帯数を用いた。農作物資産は、市区町村別の生産量や耕地面積に関する長期統計が存在しないため、2015年の作物統計における市区町村別作物別生産量を各年の値として用いた。データが市区町村スケールで公表されていない年度については、県単位でのデータを市区町村ごとの世帯数に基づき按分した。

本章の分析では、上述の手順を1966年から2015年までの50年について行った。各項

目の算出式において用いる項目の調査が行われていない年度については項目ごとに線形補間を行い、また該当する調査項目が存在しない場合は最も古い調査値を用いた。なお、1966年から1969年間の各統計値の線形補間には、1965年の統計結果を用いている。

### 3-1-2. 旧FD法の概要と小スケールの領域に適用する際の問題点

従来のFD法を用いた既往の研究[34, 35, 36]は都道府県スケールを対象とし、分析期間の全年の罹災世帯率と平均損傷率に対して、一般的な連続確率分布のパラメタを推定することで、確率分布を当てはめている。また、本論文の第2章では、一級水系の流域スケールを対象として、同様の処理を行っている。一方で本章においては、市区町村スケールを対象とする。市区町村ごとに水害記録を集計した場合、都道府県ごとや流域ごとなど地理的規模が大きい領域で集計した場合と比べると、災害の記録が存在しない年、すなわち罹災世帯率 $F$ および平均損傷率 $D$ が0である年の割合が大きくなる。

罹災世帯率 $F$ および平均損傷率 $D$ が0である年は、「災害が発生しなかった年」である。すなわち、罹災世帯率 $F$ および平均損傷率 $D$ が0である確率が対応するのは、「年間において災害が発生しない確率」であり、「年間において災害が発生し、罹災世帯率 $F$ および平均損傷率 $D$ が0である確率」ではない。一方で、罹災世帯率 $F$ 平均損傷率 $D$ が0より大きい年は、災害が発生して、罹災世帯・一般資産被害が記録された年である。すなわち、罹災世帯率 $F$ および平均損傷率 $D$ がそれぞれの0より大きい場合の確率分布は、「年間において災害が発生した場合の、罹災世帯率 $F$ および平均損傷率 $D$ の確率分布」であり、罹災世帯率 $F$ および平均損傷率 $D$ が0である確率とは対応する事象が異なる。よって、罹災世帯率 $F = 0$ と $F > 0$ の間や、平均損傷率 $D = 0$ と $D > 0$ の間で、確率分布関数が常に連続であることを前提とした確率分布の当てはめを行うべきではない。

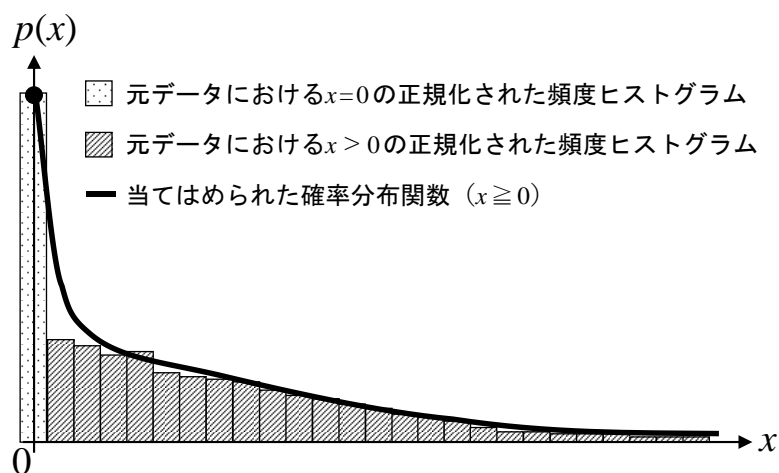


図 3-2 0の割合が多いデータ列に連続的な確率分布関数を当てはめた模式図

従来のFD法では、罹災世帯率 $F$ 、平均損傷率 $D$ の双方について、対象期間の全年のデータを対象として、一般的な連続確率分布を当てはめている。データに0値が多く含まれる場合、罹災世帯率 $F = x$ を例とすると、図3-2のように、 $x > 0$ の0近傍の確率密度関数の形状は $x = 0$ の割合の影響を受ける。また、連続確率分布の確率密度関数の定義から、 $x = 0$ となる確率は、式3-2より0となる。すなわち、一般的な連続確率分布を当てはめた場合、罹災世帯率 $F = 0$ となる「年間において災害が発生しない確率」を考慮することは出来ない。

$$P(x = 0) = \int_0^0 p(x)dx = 0 \quad \dots\dots \text{式(3-2)}$$

この確率分布を用いてモンテカルロ法により発生させた罹災世帯率 $F$ の年超過確率のグラフ概形は図-3のようになる。図-2の確率密度関数に従うと、 $x > 0$ の0近傍の罹災世帯率 $F$ が多く生成されることから、水害統計から求まる各年の罹災世帯率 $F$ の分布と比較すると、再帰期間が短く年超過確率が大きい領域において $F > 0$ となる。このため、この領域において罹災世帯率 $F = 0$ となること、すなわち「災害が発生しない年が存在すること」を再現できない。この結果、式3-1に基づき算出される水害リスクにおいても、再帰期間が短く年超過確率が大きい実際には災害が発生しない領域において水害リスクが見積もられ、最終的に算出される水害リスクカーブが本来の水害リスク特性を正確に反映しないおそれがある。同様の課題は、従来のFD法での平均損傷率 $D$ の当てはめに関しても存在する。

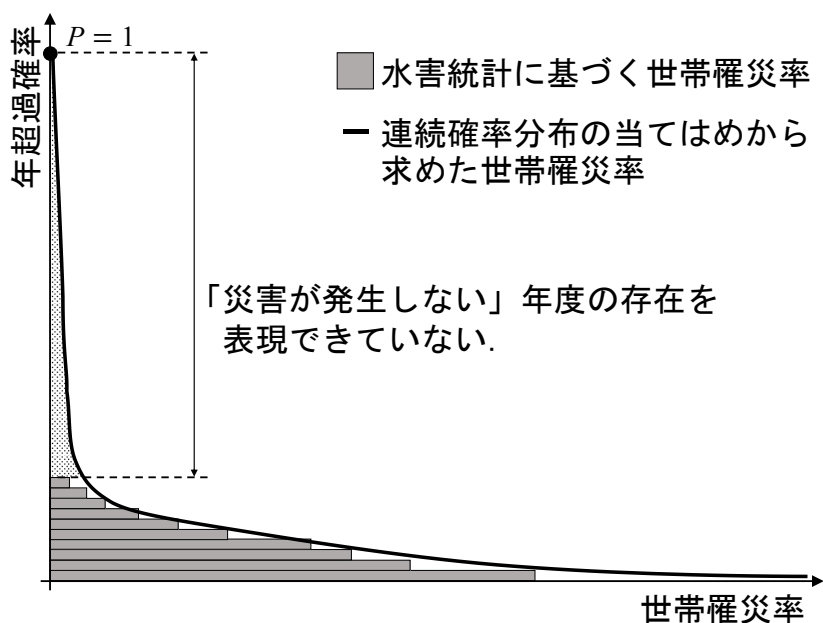


図3-3 通常の連続確率分布を当てはめた場合の罹災世帯率と年超過確率の関係（従来のFD法）

本研究は、地理的規模が小さい市区町村スケールを対象とした水害リスクカーブの作成を試みるため、上述の課題に対処することが重要となる。

### 3-1-3. 改良 Frequency-Damage 法の概要

本章で提案する改良FD法では、前節で述べた課題点への対応として、罹災世帯率 $F$ の頻度分布への確率分布の当てはめにおいて、用いる確率関数に条件付き確率分布の考え方を導入する。なお、平均損傷率 $D$ の頻度分布への確率分布の当てはめについては、3-1-5で述べる。

まず、「年間において災害が発生する確率」と「年間において災害が発生しない確率」を、ベルヌイ分布型の離散確率パラメタを用いて表現する。具体的には、 $x = 0$ でベルヌイ分布のパラメタ $q$ を用いて確率質量関数 $p(x = 0) = q$ と定め、「年間において災害が発生しない確率」を表す。一方、 $x > 0$ の領域においては、一般的な連続確率分布（指数分布・対数正規分布・ワイブル分布・ガンベル分布・ガンマ分布・ジョンソンSU分布）を $x > 0$ において $f(x)$ としたとき、確率密度関数として $p(x; x > 0) = (1 - q) \cdot C \cdot f(x)$ と定め、「年間において災害が発生し、罹災世帯率 $F = x$ である確率」を表す。なお、 $C$ は $x > 0$ での $C \cdot f(x)$ の広義積分値を1とし、 $p(x)$ が $x \geq 0$ の台で確率分布の定義を満たすように定められる定数である。これら2つの定義を組み合わせた確率分布 $p(x; x \geq 0)$ を、式(3-3)のように定義する。例として、 $f(x)$ が指数分布の場合の $p(x)$ を式(3-4)に示す。

$$p(x) = \begin{cases} q & (x = 0) \\ (1 - q) \cdot C \cdot f(x) & (x > 0) \end{cases} \quad \dots\dots \text{式(3-3)}$$

$$p(x) = \begin{cases} q & (x = 0) \\ (1 - q) \cdot \lambda e^{-\lambda x} & (x > 0) \end{cases} \quad \dots\dots \text{式(3-4)}$$

新たに定義した確率分布は、「年間において災害が発生する確率／しない確率」を表す確率質量関数部分と、「災害が発生した場合に、罹災世帯率 $F$ が $x$ である確率」を表す確率密度関数部分の積である。特に、確率 $P(x = 0)$ は確率質量関数より $P(x = 0) = q$ と定まり、式(3-3)で定義される確率分布は、「年間において災害が発生しない確率」を陽に考慮できる。式(3-3)で表される罹災世帯率 $F$ の頻度分布と確率分布の概形は図3-4のようになる。 $x = 0$ と $x > 0$ 領域の確率分布は定義式から一般に連続でなく、また、ベルヌイ分布のパラメタ $q$ は $f(x)$ の式形と関係ないため、 $x > 0$ の0近傍の確率密度関数の形状は $p(x = 0) = q$ の値から影響を受けない。この確率分布を用いてモンテカルロ法により発生させた罹災世帯率 $F$ の年超過確率に関するグラフは図3-5のようになる。

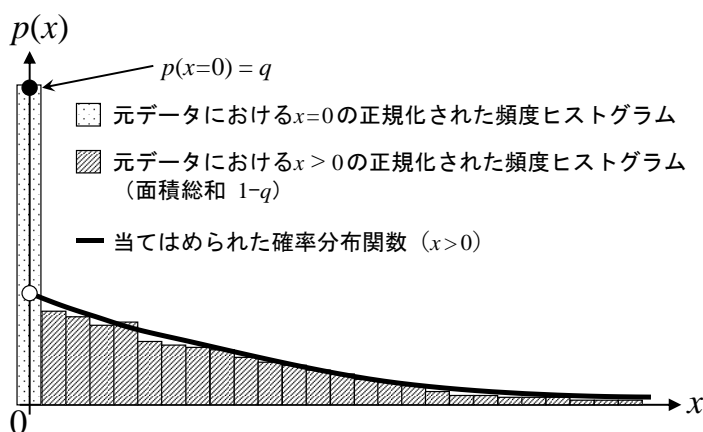


図 3-4 改良FD法で用いる確率分布を当てはめた場合の模式図

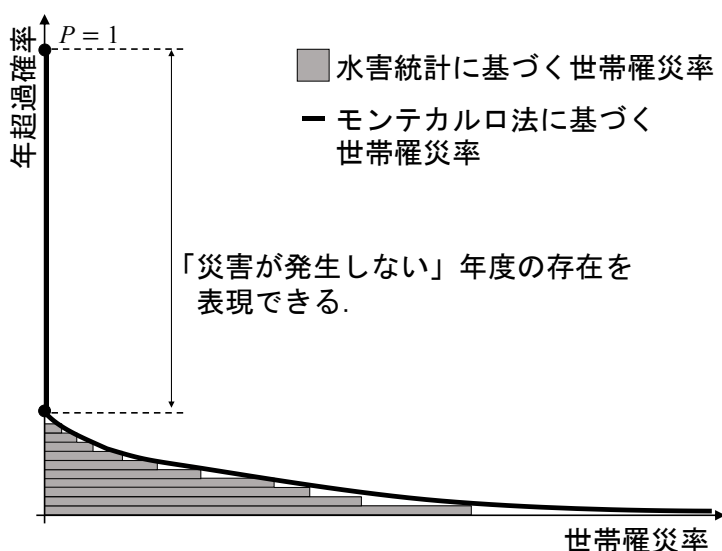


図 3-5 条件付き確率を導入した確率分布を当てはめた場合の罹災世帯率と年超過確率の関係 (改良FD法)

確率質量関数の定義より、罹災世帯率  $F = 0$  となる仮想年が  $p = q$  の確率で生成される。このため、水害統計から求まる各年の罹災世帯率  $F$  の分布と比較すると、再帰期間が短く年超過確率が大きい領域において罹災世帯率  $F = 0$  となること、すなわち「災害が発生しない年が存在すること」を再現できる。

以上のように、従来のFD法と改良FD法の第一の相違点は、罹災世帯率  $F$  に当てはめる確率分布の違いである。改良FD法において用いる  $p(x)$  は、式(3-3)に示される通り、条件付き確率の考え方に基づいて導入したベルヌイ分布のパラメタ  $q$  により、災害が発生せずに  $x = 0$  となる年の存在の再現が可能となり、また  $x = 0$  と  $x > 0$  領域の不連続性も表現できる。

### 3-1-4. 改良FD法で導入する確率分布の尤度に関する検討

改良FD法においても、従来のFD法と同様に、確率分布 $p(x)$ のパラメタの決定には最尤法を用いている。一般的な連続確率分布と比較して、改良FD法で用いる確率分布 $p(x)$ はベルヌイ分布のパラメタ $q$ が新たに追加されており、パラメタ数の増加に伴うフィッティングの不安定化が生じないかを検討する必要がある。

式(3-3)に表される確率分布 $p(x)$ について、 $N$ 年の仮想年に関する罹災世帯率データ列 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n\}$ に関する尤度 $L$ を考える。罹災世帯率データ列 $X$ の中で、水害が発生せず $x_i = 0$ である仮想年の数が $M$ 年 ( $0 \leq M \leq N$ ) であるとき、罹災世帯率データ $X$ を、「災害が発生しなかった $M$ 年に関する罹災世帯率 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_M: y_i = 0\}$ 」と、「災害が発生した $N - M$ 年に関する罹災世帯率 $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_{N-M}: z_i \neq 0\}$ 」に分解することができる。

ここで、式(3-3)の確率分布 $p(x)$ のデータ列 $X = Y + Z$ に関する尤度は、以下のように計算される。

$$\begin{aligned} L(p(x), X) &= \prod_{i=1}^N p(x_i) \\ &= \prod_{i=1}^M p(y_i = 0) \cdot \prod_{i=1}^{N-M} p(z_i \neq 0) \\ &= \prod_{i=1}^M q \cdot \prod_{i=1}^{N-M} (1 - q)f(z_i) \\ &= q^M \cdot (1 - q)^{N-M} \cdot \prod_{i=1}^{N-M} f(z_i) \end{aligned}$$

対数尤度 $\ln L$ については、上記の表記を引き継いで、以下のように計算できる。

$$\begin{aligned} \ln L(p(x), X) &= \ln \left\{ q^M \cdot (1 - q)^{N-M} \cdot \prod_{i=1}^{N-M} f(z_i) \right\} \\ &= M \ln q + (N - M) \ln(1 - q) + \sum_{i=1}^{N-M} \ln f(z_i) \quad \dots\dots\dots \text{式(3-5)} \end{aligned}$$

式(3-5)の第1項・第2項は、ベルヌイ分布のパラメタ $q$ を含む一方で、連続確率分布 $f(x)$ の内部パラメタからは独立である。対照的に、第3項は、連続確率分布 $f(x)$ の内部パラメタを含む一方で、ベルヌイ分布のパラメタ $q$ からは独立である。また、第3項は、データ列 $Z$ に関する連続確率分布 $f(x)$ の対数尤度と等しい。したがって、確率分布 $p(x)$ のデータ列 $X = Y + Z$ に関する対数尤度の最大化を行う場合、式(3-5)の第1項・第2項のパラメタ $q$ に関する最大化と、式(3-5)の第3項のデータ列 $Z$ に対する最大化を独立して行えばよい。ここで、式(3-5)の第1項・第2項を $G(q)$ と置くと、 $G(q)$ は以下の検討から $q = q^* = M/N$ で最大化されることがわかる。



$$\frac{dG(q)}{dq} = m \cdot \frac{1}{q} + (N - M) \cdot \frac{-1}{1 - q} = \frac{M - Nq}{q(1 - q)}$$

すなわち、パラメタ $q$ については任意のデータ列 $X$ に関する定数解析解が存在し、その値は $p(x)$ に含まれる他のパラメタ、すなわち $f(x)$ の内部パラメタには影響されないことが示された。一方で、 $f(x)$ の内部パラメタの決定は前述の通り式(3-5)の第3項に基づいて行われる。どのような連続確率分布 $f(x)$ についても、その内部パラメタの決定には災害が発生した年度に関するデータ列 $Z$ のみを用い、パラメタ $q$ からは独立であることが理解される。以上の検討より、改良FD法で用いる確率分布 $p(x)$ について、パラメタ数の増加に伴うフィッティングの不安定化は生じない。

改良FD法では、様々な連続確率分布 $f(x)$ 部分を持つ確率分布 $p(x)$ について、それぞれ最尤法でパラメタを決定する。その後、最も当てはまりの良い確率分布 $p(x)$ として、赤池情報量基準AICを最小化する $p(x)$ を選択している。

ここで、連続確率分布 $f(x)$ の内部パラメタ数を $\alpha$ 、最尤法により選択された内部パラメタを持つ連続確率分布を ${}^*f(x)$ をとすると、 ${}^*f(x)$ を用いた $p(x)$ のパラメタ数は $\alpha + 1$ となり、赤池情報量基準AICを式(3-5)の表記を引き継いで表すと、以下ようになる。

$$\begin{aligned} \text{AIC} &= -2 \ln L + 2k \\ &= -2 \left\{ G \left( {}^*q = \frac{N}{M} \right) + \sum_{i=1}^{N-M} \ln {}^*f(z_i) \right\} + 2(1 + \alpha) \\ &= -2G \left( {}^*q = \frac{N}{M} \right) + 2 - 2 \cdot \sum_{i=1}^{N-M} \ln {}^*f(z_i) + 2\alpha \quad \dots\dots\text{式(3-6)} \end{aligned}$$

式(3-6)の第1項・第2項は $p(x)$ の確率質量関数部分に基づく値であり、連続確率分布 $f(x)$ を変更しても、同一のデータ列 $X$ に対して $p(x)$ を当てはめている限りその値が変化しない定数である。一方で、第3項・第4項は $p(x)$ の確率密度関数部分に基づく値であり、連続確率分布 $f(x)$ を変更することによりその値が変化する部分である。したがって、同一のデータ列 $X$ に関して最尤法によるパラメタ推定を行った確率分布 $p(x)$ 群について、赤池情報量基準AICの差異は、 $p(x)$ の確率密度関数部分にのみ起因することとなる。

確率密度関数と確率質量関数は両方とも確率分布としての条件を満たすが、その性質は大きく異なる。確率密度関数の値は確率そのものとは異なり、また確率密度関数の値自体も1より大きくなりうる。あるデータ列 $X$ に対するあるパラメタを持つ確率分布の尤度の値は1より大きくなりうる。対照的に、確率質量関数の値は確率そのものと対応し、どのようなデータ列に対しても、確率質量関数の形の確率分布の尤度は常に1以下となる。したがって、確率密度関数としての確率分布と確率質量関数としての確率分布の2つの確率分布について、あるデータ列 $X$ に対する当てはまりの良さを比較する際に、それぞれの尤度や、それに関連した値である赤池情報量基準AICを算出して比較することは無意味である。

この問題は確率密度関数と確率質量関数を組み合わせた関数形を持つ改良FD法の確率分布 $p(x)$ についても生じる。しかし、前述の検討の通り、データ列 $X$ が固定されている場合、尤度や赤池情報量基準AICの変化は、連続確率分布 $f(x)$ 部にのみ由来するので、赤池情報量基準AICの比較に基づいた最も当てはまりの良い確率分布 $p(x)$ の選択が可能である。その一方で、異なるデータ列に対する尤度の比較は行うべきではない。

また、確率分布 $p(x)$ のパラメタ推定において、連続確率分布 $f(x)$ の内部パラメタ推定は、データ列 $X$ のうち、災害が発生した年度のデータ列 $Z$ にのみ基づく。したがって、分析対象となる自治体の罹災世帯率 $F$ のデータ $X$ は、 $f(x)$ 中のパラメタ推定の信頼性のために、災害が発生した年度のデータも十分含んでいる必要がある。仮に、災害が発生した年度がほとんどなく、ほぼ全ての年度で0値である罹災世帯率 $F$ のデータに対して $p(x)$ を当てはめた場合、 $f(x)$ 中のパラメタ推定はごく少数のデータに基づいて行われるため、「災害が発生した年における罹災世帯率 $F$ の確率分布」の正確性が十分に保証できない。

したがって、従来のFD法が「多くの年度で水害が発生し、罹災世帯率 $F$ に0値をあまり含まない」ような領域スケールへ適用可能であったのに対し、改良FD法は「領域内で水害が発生しない年度が多く、罹災世帯率 $F$ に0値を多く含むが、同時に水害が発生した年度もある程度含む」ような領域スケールにまでは適用可能な手法である。この適用可能な対象データの性質の範囲の違いが、従来のFD法と改良FD法の第二の相違点である。

### 3-1-5. 改良FD法での平均損傷率 $D$ の確率分布推定

改良FD法では、罹災世帯率 $F$ と同様に平均損傷率 $D$ についても、災害が発生しない年、つまり罹災世帯率 $F = 0$ の年における平均損傷率 $D_1$ と、災害が発生する年、つまり罹災世帯率 $F > 0$ の年における平均損傷率 $D_2$ とについて、それぞれ条件付き確率を考えることができる。すなわち、平均損傷率 $D$ の全データに関する確率分布もまた、式(3-3)に示されるような、 $D = 0$ と $D > 0$ で本質的に連続でない式形となる。

$$p(x) = \begin{cases} q & (x = 0) \\ (1 - q) \cdot C \cdot f(x) & (x > 0) \end{cases} \quad \dots\dots \text{式(3-3)}$$

※再掲

ただし、改良FD法では、ある仮想年について、罹災世帯率 $F$ の生成により、その仮想年が「災害が発生する年」か、「災害が発生しない年」かが明らかになるため、平均損傷率 $D$ については、「災害が発生する年」と「災害が発生しない年」の割合を示すベルヌイ分布のパラメタ $q$ を推測する必要はなく、その仮想年で災害が発生するか否かが与えられた場合の条件付き確率分布のみが必要となる。

災害が発生しない年における平均損傷率 $D_1$ については、災害が発生しない年の平均損傷率 $D_1 = 0$ であることから、 $P(D_1 = 0) = 1$ となることは明らかである。

一方で、災害が発生する年における平均損傷率 $D_2$ は、水害統計において災害が発生した

年、すなわち平均損傷率 $D > 0$ となる年の平均損傷率のみを対象として、一般的な連続確率分布の当てはめを行えば良い。各連続確率分布のパラメタ推定には最尤法を用いる。その後、推定されたパラメタに基づき、対象年の平均損傷率 $D_2$ について赤池情報量基準 AIC を最小化する確率分布を、災害が発生する年における平均損傷率 $D_2$ の分布関数として選択する。なお、災害が発生した平均損傷率 $D > 0$ となる年のみを当てはめの対象とするため、パラメタ推定の信頼性のために、データセットは平均損傷率 $D > 0$ となる年数、すなわち災害が発生した年数も十分含んでいる必要がある。この条件は前項で論じた従来のFD法と改良FD法の適用可能な対象データの性質の範囲の違いと同様である。

なお、実際に改良FD法を行う際には、基本式である式(3-1)から明らかなように、世帯罹災率 $F = 0$ の年の総被害額 $L$ は平均損傷率 $D$ の値にかかわらず $L = 0$ となるので、すべての仮想年について、災害が発生する年度の条件付き確率分布で平均損傷率 $D$ の値を生成して問題はない。

#### 3-1-6. モンテカルロ法による水害リスクカーブの算出

対象領域に関する罹災世帯率 $F$ の確率分布と、平均損傷率の災害が発生する年度での条件付き確率分布を求めたのちに、モンテカルロ法を用いて、1万年分の仮想年に関する世帯罹災率 $F$ と平均損傷率 $D$ を生成し、改良FD法の基本式である式(3-1)を用いて、1万年分の年間被害額 $L$ を算出した。なお、式(3-1)における世帯数 $N$ および一世帯あたり一般資産額 $E$ には、各自自治体における2015年の値を用いた。

最後に、生成された年間被害額 $L$ から、被害額に対応する年超過確率を求め、水害リスクカーブを作成する。

### 3-2. 改良FD法と旧FD法の結果の比較

#### 3-2-1. 検討対象

本研究における市区町村は、2017年12月現在の市町村および東京都特別区、計1741自治体を指す。本節で述べた通り、水害による被害記録のある年数が極端に少ない自治体の場合、改良FD法においても、「災害が発生する年の罹災世帯率 $F$ 」の確率分布に含まれる $f(x)$ のパラメタや、「災害が発生する年の平均損傷率 $D_2$ 」の確率分布のパラメタを推定する際の信頼性が確保できない。本研究では、「内水のみ」・「外水のみ」・「内水および外水」の3種類の水害原因のそれぞれについて、被害記録がある年数が10年以上である自治体をFD法および改良FD法による分析対象とした。水害原因ごとに10年以上の水害履歴が存在する市区町村の割合を表3-1に示した。分析期間は1966年から2015年の50年間である。

表 3-1 水害記録の年数と水害の原因

水害の原因	水害記録年数が10年以上	水害記録年数が10年未満
内水のみ	799市区町村(45.9%)	942市区町村(54.1%)
外水のみ	361市区町村(20.7%)	1380市区町村(79.3%)
内水および外水	1002市区町村(57.6%)	739市区町村(42.4%)

#### 3-2-2. 結果を分析するための指標の導入

ある該当自治体に関して、従来のFD法と改良FD法の双方で水害リスクカーブを求めたとき、それら2つのリスクカーブをどのように評価するかが問題となる。最も単純な手法としては、「真のリスクカーブ」と求めた2本のリスクカーブの形状的な近接性から評価を行うことが考えられるが、確率的リスク特性の真値ともいえる「真のリスクカーブ」を求めることは不可能である。したがって、利用可能な何らかの代替データを仮の真値として採用し、それとの近接性から評価を行うこととする。本研究が利用するデータ群の中で、もっとも確率的リスク特性の真値と近いものは、50年間にわたって記録された検討対象領域の年間被害額列であると考えられる。よって、本章においては、各自治体の実際の年間被害額列に基づいた実被害額年超過確率関数曲線（以下、実績曲線）を暫定的な真値とし、従来のFD法と改良FD法のそれぞれで求めた2本の水害リスクカーブが、実績曲線にどの程度近い形状をしているかに基づいて、2つの手法を比較することとする。

図3-6に示すように、実績曲線は階段関数型となり、その左下面積は、検討対象の50年間に関する平均年間被害額と等しい。この面積はリスク実績値であり、実際には求められない真のリスク値の指標と考えられる。一方で、図3-7に示すように、水害リスクカーブは曲線的となり、その左下面積は、その水害リスクカーブを持つ領域の被害額期待値と等しい。

この値は、該当市区町村のリスク推定値である。したがって、リスク実績値とリスク推定値の比較から、各手法で求めた水害リスクカーブの精度を検証できると考えられる。

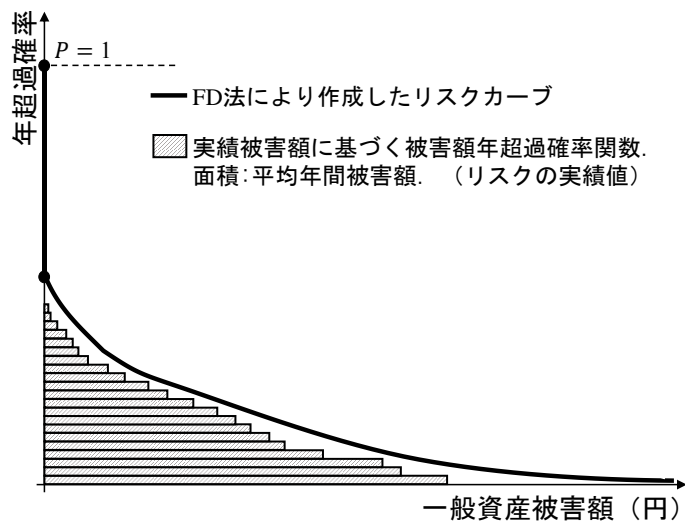


図 3-6 実績被害額に基づく平均年間被害額

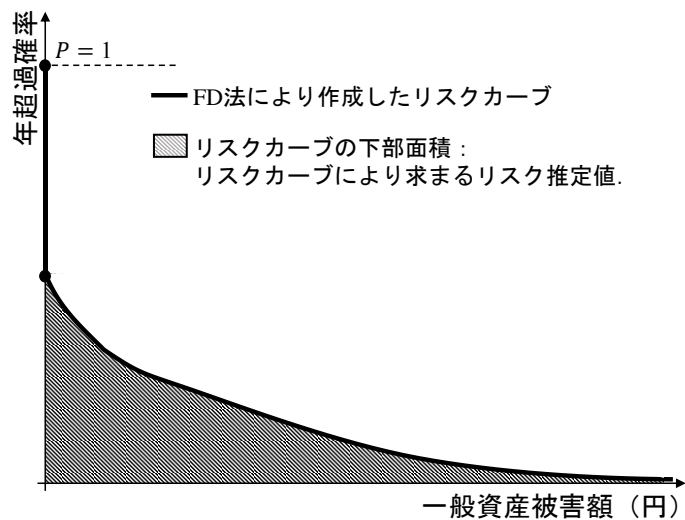


図 3-7 リスクカーブに基づく被害額期待値

X軸にリスク実績値を、Y軸にリスク推定値をとった図に示す平面上において、検討対象の各市区町村は、従来のFD法と改良FD法のそれぞれについて、1つの点としてプロットされる。リスクカーブから求まるリスク推定値が実績値と近い場合、リスク推定値と実績値が等しいことを示す直線近くに、その自治体を示すマーカーはプロットされることとなる。水害リスクの実績値である平均年間被害額は自治体ごとに大きく異なるため、精度評価の基準となるリスク実績値が自治体間で大きく異なれば、誤差の絶対値が同一の場合でも、リスク算出の精度は異なる。したがって、誤差の絶対値ではなく、誤差の絶対値の平均年間被害額に対する比率（相対誤差）に基づく指標を、リスク算出の精度評価に用いる必要がある。本研究では、平均年間被害額に対するリスク推定値の平均絶対誤差率（MAPE）および平均平方二乗誤差率（RMSPE）を用い、リスク算出の精度評価を行う。定義を式(3-7)、式(3-8)に示す。なお、 $i$ ：対象自治体の通し番号、 $n$ ：対象自治体の総数、 $f_i$ ：自治体*i*のリスクカーブから求まるリスク推定値（円）、 $x_i$ ：自治体*i*の平均年間被害額（円）である。なお、MAPEとRMSPEはともに真値データ群に対する推測値データ群の誤差を評価するための指標であるが、一つの大きな誤差を含むデータに対して、RMSPEのほうがMAPEに比べてより値の増加率が大きく、より懲罰的な挙動を示すことである。

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{f_i - x_i}{x_i} \right| \quad \dots\dots \text{式(3-7)}$$

$$\text{RMSPE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{f_i - x_i}{x_i} \right)^2} \quad \dots\dots \text{式(3-8)}$$

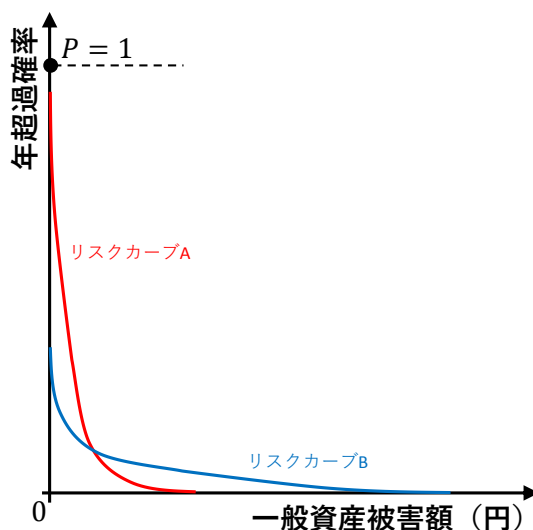


図 3-8 被害額期待値が同一で形状が異なるリスクカーブの例

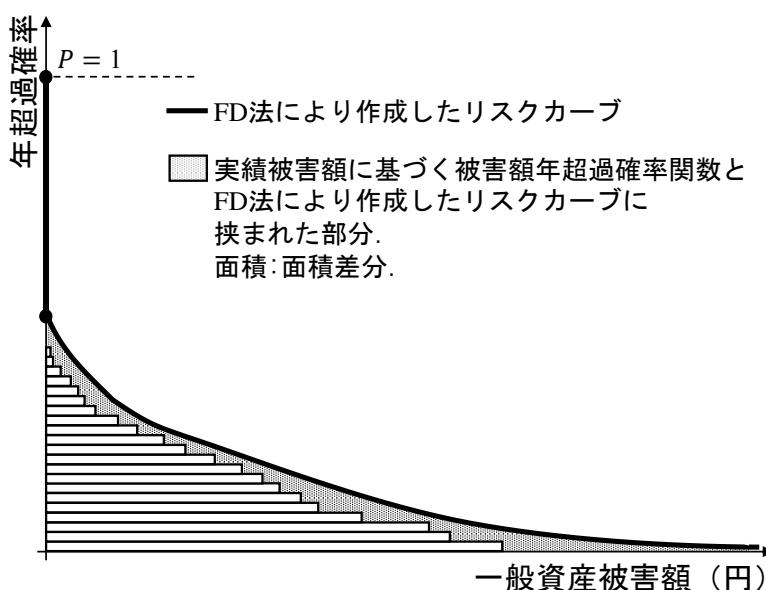


図 3-9 面積差分の定義

一方で、リスク実績値とリスク推定値はともに、図 3-6 と図 3-7 に示したように、それぞれの関数の左下面積の値にのみ着目した値であり、その関数の形状については考慮できない。図 3-8 に示す 2 つのリスクカーブは、同一のリスク推定値を持つが、その形状は全く異なる。水害リスクカーブの形状は確率的リスク特徴を表すため、実績曲線と求めた水害リスクカーブの形状が近いとき、各自治体の過去の水害記録に基づく水害リスクの確率的特徴を、求めた水害リスクカーブはよりよく再現していると考えられる。したがって、リスク推定値のみならず、その確率的リスク特徴である水害リスクカーブの形状についても、実績曲線とどの程度近いかを表現する何らかの指標が必要となる。

ここで、図 3-9 のように、実績被害額に基づく被害額年超過確率の関数と、改良 FD 法により作成したリスクカーブの間に挟まれた部分の面積を面積差分として定義する。なお、2 つの曲線の上下関係にかかわらず全ての部分で正の値をとるものとする。面積差分は一般資産被害額と年超過確率の関係に基づいたリスクの確率的特徴に関する過去の記録とリスクカーブとの一致の程度を表す値であり、単にリスク実績値とリスク推定値の差分を表す値ではないことに注意する必要がある。実績被害額に基づく被害額年超過確率の関数の形状と、FD 法により作成したリスクカーブの形状に近いほど、面積差分は小さくなる。

ここで、面積差分をリスクの仮の真値であるリスク実績値、すなわち平均年間被害額で除した値を「面積差分率」として定義する、この面積差分率は、実績曲線の確率的リスク特性と、新旧 FD 法で求めた水害リスクカーブの確率的リスク特性がどれほど近いを示す指標として考えられる。

次項では、リスク実績値とリスク推定値の比較に基づくリスク量自体の推定精度の検討と、面積差分率による確率的リスク特性の推定精度の検討の双方から、改良 FD 法と従来の FD 法の結果を比較検討する。

### 3-2-3. 内水を原因とする水害に関する新旧FD法の比較

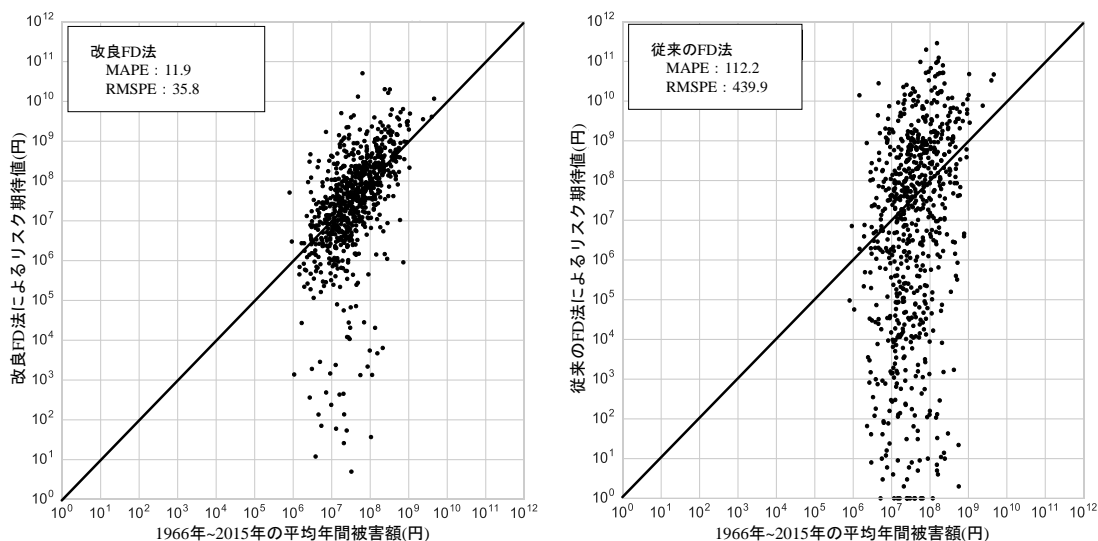


図 3-10 新旧FD法での内水に関するリスク推定値と平均年間被害額の比較

内水のみを原因とする水害を考慮したリスクカーブは、表 3-1 の通り、領域内で 10 年以上の被害が記録されている計 799 市区町村を対象として作成した。1966 年から 2015 年までの平均年間被害額は、水害リスクの実績値であり、実際には求められない真のリスク値の指標と考えられる。平均年間被害額と、改良 FD 法により作成した内水リスクカーブから求まるリスク推定値との関係を左側に、従来の FD 法により作成した内水リスクカーブから求まるリスク推定値との関係を右側にそれぞれ示した。リスクカーブから求まるリスク推定値が実績値と近い場合、リスク推定値と実績値が等しいことを示す直線近くに、その自治体を示すマーカーはプロットされることとなる。図 3 10 から、従来の FD 法による結果と比較して、改良 FD 法による結果が直線付近に分布していることが読み取れることから、従来の FD 法に比べ、改良 FD 法は、実績値により近いリスク推定値を算定していると考えられる。また、直線から大きく離れたマーカー数も、従来の FD 法に比べて改良 FD 法は少ないことから、過大評価・過小評価の傾向がともに改善されていると考えられる。また、水害リスクの実績値である平均年間被害額は自治体ごとに大きく異なることもまた読み取れる。精度評価の基準となる年間平均被害額の値が自治体間で大きく異なれば、誤差の絶対値が同一の場合でも、リスク算出の精度は異なる。したがって、前項で述べたとおり、誤差の絶対値ではなく、誤差の絶対値の平均年間被害額に対する比率（相対誤差）に基づく指標である平均絶対誤差率（MAPE）および平均平方二乗誤差率（RMSPE）を、リスク算出の精度評価に用いた。その結果、従来の FD 法では MAPE は 112.2、RMSPE は 439.9 であったのに対し、改良 FD 法では MAPE は 11.9、RMSPE は 35.8 と大幅な改善が認められ、改良 FD 法によりリスク算出の精度が向上していることが示された。

続いて、従来の FD 法および改良 FD 法により作成したリスクカーブの形状と、水害統計における 1966 年から 2015 年の各年の被害額を直接用いて作成した被害額の年超過確率関



数の形状とを比較する。前項で述べたとおり、リスクカーブの形状はリスクの確率的特徴を表すため、両者の形状が近いとき、リスクカーブに基づくリスクの確率的特徴は、各自治体の過去の水害記録に基づく水害リスクの確率的特徴とより近いと考えられ、その比較のための指標としては面積差分率を用いるものとする。

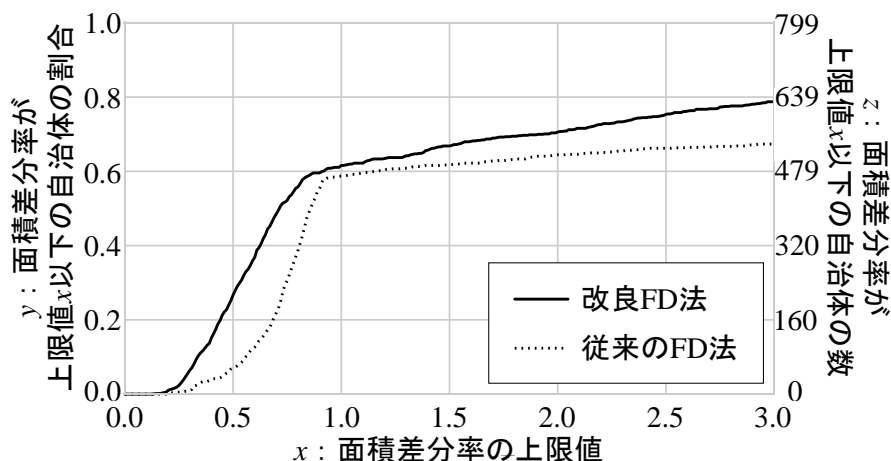


図 3-11 新旧 FD 法での内水に関する面積差分率の比較

図 3-11 に、ある面積差分率の上限値  $x$  をとったときの、面積差分率がその上限値  $x$  以下となる自治体数の検討対象自治体数 799 に対する割合  $y$  と、面積差分率がその上限値  $x$  以下となる自治体数  $z$  を示した。どのような面積差分率の上限値  $x$  に関しても、改良 FD 法に関する  $y$  および  $z$  が、従来の FD 法に関するを上回っていることが読み取れる。例として、面積差分率が上限値  $x=0.5$  以下の自治体は、従来の FD 法では 7.0%の 56 自治体であるのに対し、改良 FD 法では 26.7%の 213 自治体である。したがって、改良 FD 法により作成された市区町村スケールのリスクカーブが示すリスクの確率的特徴は、従来の FD 法に比して、各自治体の過去の水害記録に基づく水害リスクの確率的特徴とより近いと考えられる。

### 3-2-4. 外水を原因とする水害に関する新旧FD法の比較

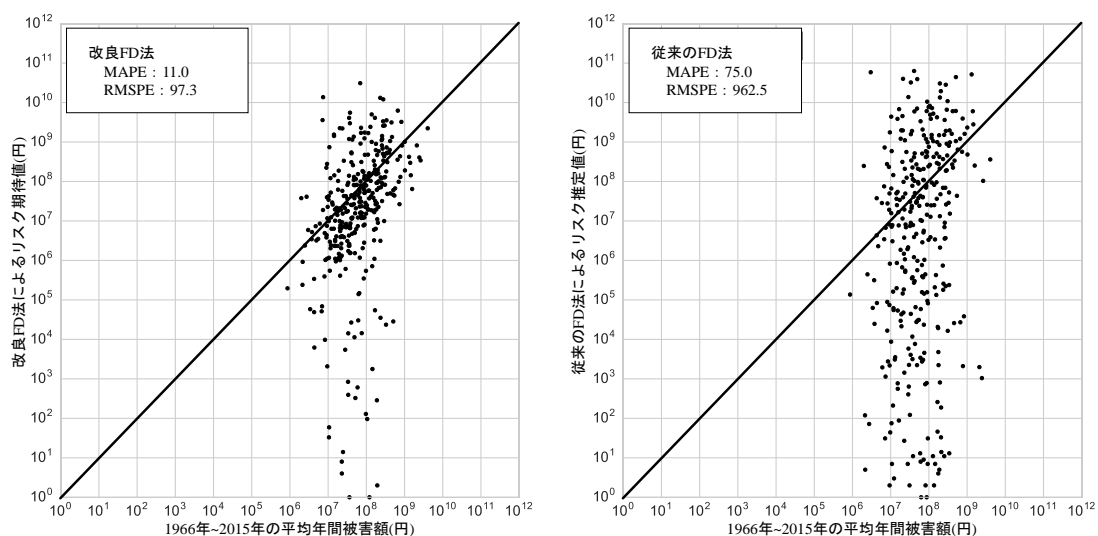


図 3-12 新旧FD法での外水に関するリスク推定値と平均年間被害額の比較

外水を原因とする水害を考慮したリスクカーブは、表 3-1 の通り、領域内で 10 年以上の被害が記録されている計 361 市区町村を対象として作成した。

リスク実績値である外水による平均年間被害額と、改良FD法により作成した外水リスクカーブから求まるリスク推定値との関係を図 3-12 左図に、従来のFD法により作成した外水リスクカーブから求まるリスク推定値との関係を図 3-12 右図にそれぞれ示した。従来のFD法による結果と比較して、改良FD法による結果が直線付近に分布していることが読み取れることから、従来のFD法に比べ、改良FD法は、実績値により近いリスク推定値を算定していると考えられる。また、直線から大きく離れたマーカー数も、従来のFD法に比べて改良FD法は少ないことから、過大評価・過小評価の傾向がともに改善されていると考えられる。

また、MAPE および RMSPE を用いた精度評価においては、従来のFD法では MAPE が 75.0、RMSPE が 962.5 である一方、改良FD法では MAPE が 11.0、RMSPE が 97.3 であり、改良FD法によりリスク算出の精度が向上していることが示された。

続いて、リスクカーブに基づくリスクの確率的特徴と、各自治体の過去の水害記録に基づく水害リスクの確率的特徴を比較するため、従来のFD法および改良FD法により作成したリスクカーブの形状と、水害統計における 1966 年から 2015 年の各年の被害額を直接用いて作成した被害額の年超過確率関数の形状を比較する。

従来のFD法と改良FD法のそれぞれで各自治体の面積差分率を算出した。図 3-13 に、ある面積差分率の上限値  $x$  をとったときの、面積差分率がその上限値  $x$  以下となる自治体数の検討対象自治体数 361 に対する割合  $y$  と、面積差分率がその上限値  $x$  以下となる自治体数  $z$  を示した。どのような面積差分率の上限値  $x$  に関しても、改良FD法に関する  $y$  お

よび  $z$  が、従来のFD法に関するを上回っていることが読み取れる。例として、面積差分率が上限値  $x=0.5$  以下の自治体は、従来のFD法では6.9%の25自治体であるのに対し、改良FD法では24.9%の90自治体である。したがって、改良FD法により作成された市区町村スケールのリスクカーブが示すリスクの確率的特徴は、従来のFD法に比して、各自治体の過去の水害記録に基づく水害リスクの確率的特徴とより近いと考えられる。

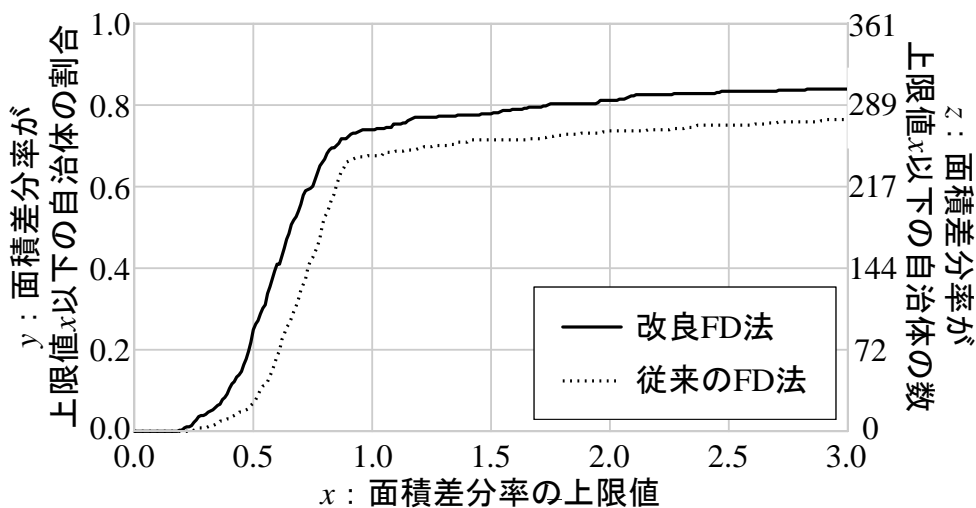


図 3-13 新旧FD法での外水に関する面積差分率の比較

### 3-2-5. 内外水を原因とする水害に関する新旧FD法の比較

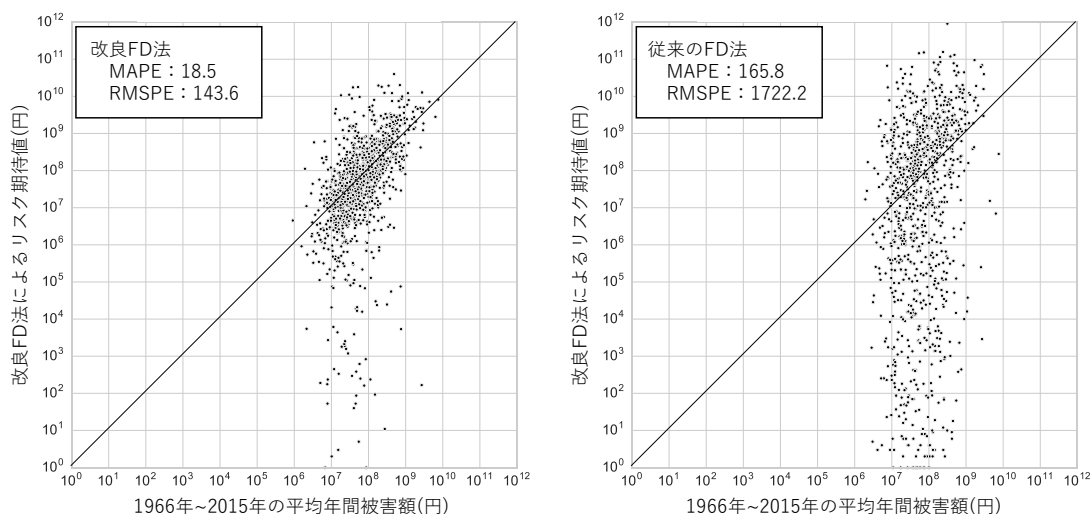


図 3-14 新旧FD法での内水および外水に関するリスク推定値と平均年間被害額の比較

内水および外水を原因とする水害を考慮したリスクカーブは、の通り、領域内で10年以上の被害が記録されている計1002市区町村を対象として作成した。

リスク実績値である内水および外水による平均年間被害額と、改良FD法により作成した内水および外水リスクカーブから求まるリスク推定値との関係を図3-14左図に、従来のFD法により作成した内水および外水リスクカーブから求まるリスク推定値との関係を図3-14右図にそれぞれ示した。従来のFD法による結果と比較して、改良FD法による結果が直線付近に分布していることが読み取れることから、従来のFD法に比べ、改良FD法は、実績値により近いリスク推定値を算定していると考えられる。また、直線から大きく離れたマーカー数も、従来のFD法に比べて改良FD法は少ないことから、過大評価・過小評価の傾向がともに改善されていると考えられる。

また、MAPEおよびRMSPEを用いた精度評価においては、従来のFD法ではMAPEが165.8、RMSPEが1722.2である一方、改良FD法ではMAPEが18.5、RMSPEが143.6であり、改良FD法によりリスク算出の精度が向上していることが示された。

続いて、リスクカーブに基づくリスクの確率的特徴と、各自治体の過去の水害記録に基づく水害リスクの確率的特徴を比較するため、従来のFD法および改良FD法により作成したリスクカーブの形状と、水害統計における1966年から2015年の各年の被害額を直接用いて作成した被害額の年超過確率関数の形状を比較する。

従来のFD法と改良FD法のそれぞれで各自治体の面積差分率を算出した。図3-15に、ある面積差分率の上限値 $x$ をとったときの、面積差分率がその上限値 $x$ 以下となる自治体数の検討対象自治体数1002に対する割合 $y$ と、面積差分率がその上限値 $x$ 以下となる自治体数 $z$ を示した。どのような面積差分率の上限値 $x$ に関しても、改良FD法に関する $y$ および $z$ が、従来のFD法に関するを上回っていることが読み取れる。例として、面積差分率

が上限値  $x=0.5$  以下の自治体は、従来のFD法では8.7%の87自治体であるのに対し、改良FD法では29.2%の293自治体である。したがって、改良FD法により作成された市区町村スケールのリスクカーブが示すリスクの確率的特徴は、従来のFD法に比して、各自治体の過去の被害記録に基づく被害リスクの確率的特徴とより近いと考えられる。

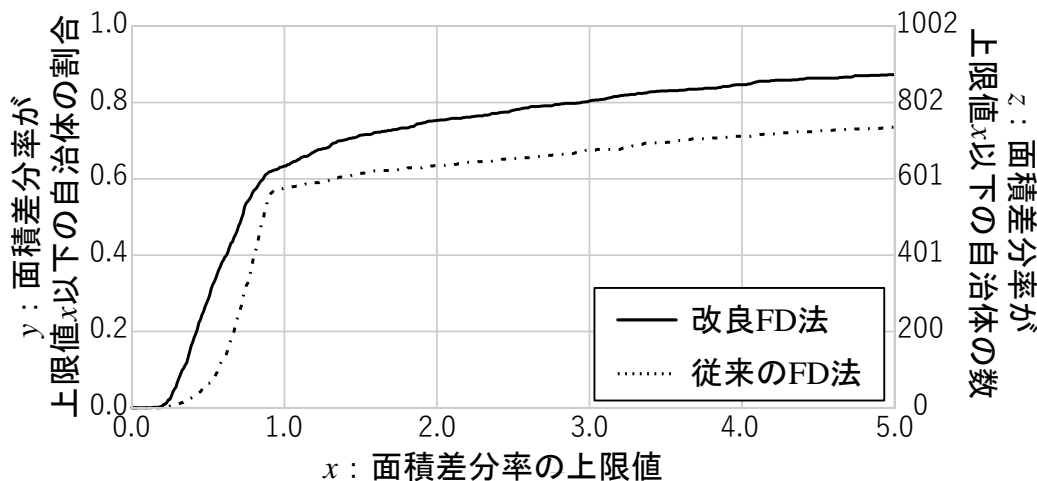


図 3-15 新旧FD法での内水および外水に関する面積差分率の比較

### 3-2-6. 改良FD法と従来のFD法の比較まとめ

3-2-3 から 3-2-5 において、異なる被害原因に着目し、改良FD法と従来のFD法に基づいた被害リスクカーブの算出結果の相互比較を行った。結果として、リスク推定値というリスク量の観点と、リスクカーブ形状に示された確率的特徴という観点のそれぞれから、改良FD法が従来のFD法と比べて市区町村スケールへの適用性が向上していることが示された。

### 3-3. 考察

前節 3-2 においては、本章で提案した改良 FD 法について、従来の FD 法との比較から、市区町村スケールへの適用性が向上していることを示した。本節では、改良 FD 法を用いて求めた水害リスクカーブのうち、内水および外水の双方を原因としたものについて、その確率的リスク特性を分析する。

#### 3-3-1. 市区町村スケールの確率的リスク特性の分析

市区町村スケールで算出した多数の水害リスクカーブについて、目視でその形状に表される確率的特性を比較することは難しい。本節では、2-2 で導入した「再帰期間ごとのリスク寄与率」指標を用いて、市区町村スケールの確率的リスク特性の多様性や地域性を分析することを試みる。

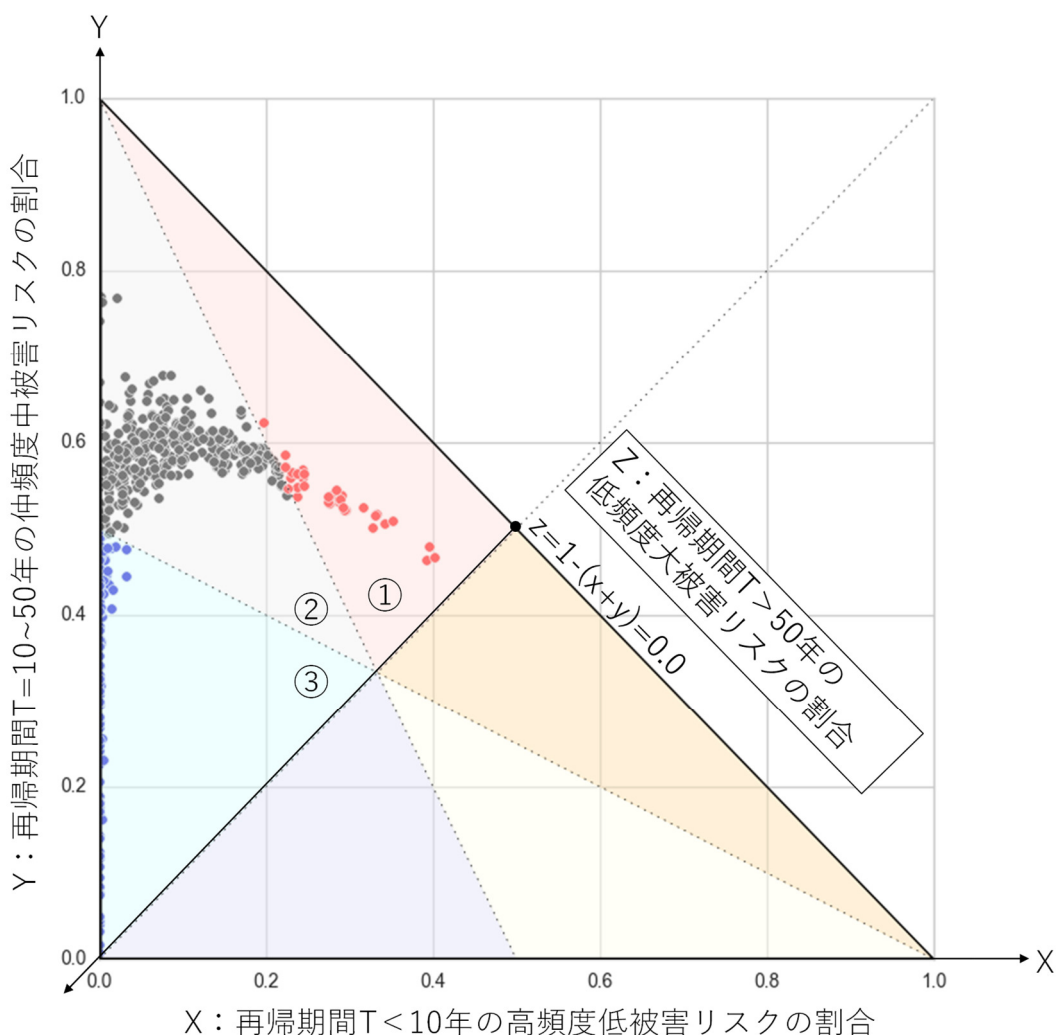


図 3-16 市区町村スケールでの再帰期間ごとの内外水リスク寄与率

図 3-16 に再帰期間ごとのリスク寄与率に基づいて分析対象の 1002 市区町村の改良 FD 法によるリスクカーブをプロットした図を示した。各点は一つの自治体に対応し、X, Y, Z の大小関係によって定まる背景色で示した 6 領域のうち、赤色の領域①、灰色の領域②、水色の領域③に分布していることが読み取れる。

赤色の領域①においては、 $Y > X > Z$  の関係が成り立つ。すなわち、低頻度大被害リスクの寄与率が最も小さい一方で、より頻繁に生じる小規模な被害のリスクがリスクの主要因となる自治体がこの領域①にプロットされる。この領域にプロットされた自治体群を、類型 A の市区町村とする。

水色の領域③においては、 $Z > Y > X$  の関係が成り立つ。すなわち、低頻度大被害リスクの寄与率が最も大きく、リスクの主要因となっている一方で、より頻繁に生じる小規模な被害のリスクは、リスクに相対的にあまり寄与していない。このような確率的リスク特性を持つ自治体がこの領域③にプロットされる。この領域③にプロットされた自治体群を、類型 C の市区町村とする。

なお、灰色の領域②については、 $Y > Z > X$  の関係が成り立つ。すなわち、中頻度中被害リスクの寄与率が最も大きく、リスク主要因となっている。この領域②にプロットされた自治体群を、類型 B の市区町村とする。なお、類型 B については、類型 A および類型 C の中間領域という性質が強く、際立った特徴を見出しづらい。

類型 A から類型 C までの各類型の市区町村は全国各地域に分布しており、流域スケールでは見出されたような確率的リスク特性の地域性は、市区町村スケールでは見いだせなかった。したがって、本章の対象スケールでの確率的リスク特性には、前章で検討した流域スケールでの地質地形的要因や気候的要因ではなく、より小スケールの要因が影響を与えていると考えられる。しかし、我が国のすべての水系について、流域内に含まれる自治体のリスク形態の分布を調査することは難しい。そこで本研究では、最上川水系と吉野川水系の 2 水系を対象に、河川流域の地形分類に着目し、流域内の主要な中地形分類に従って、流域内での確率的リスク特性の分布を考察する。なお、我が国の河川流域において一般的な中地形分類を図 3-17 に示す[59, 60]。

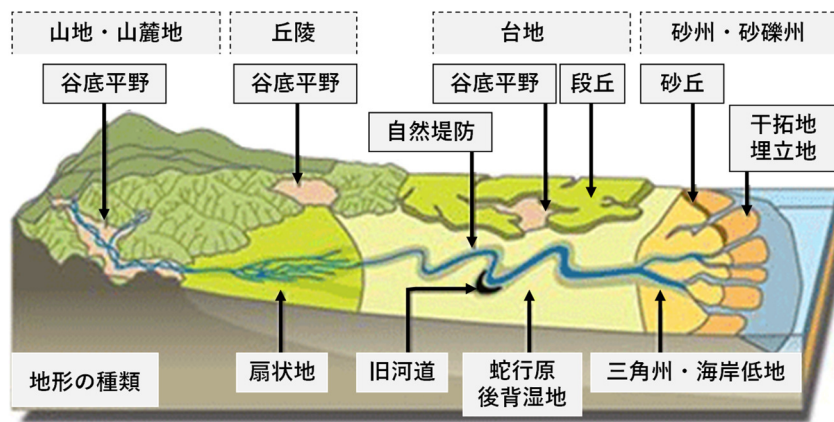


図 3-17 我が国の一般的な河川流域における中地形分類 ([59,60]を筆者編集)

### 3-3-2. 流域内の自治体間の確率的リスク特徴の差異の例 ①：吉野川水系

吉野川は、高知県瓶ヶ森を源流とし、四国山地を横断する形で徳島県東部に於て紀伊水道に注ぐ一級河川であり、一級水系吉野川水系の本流である。本川の流路延長は194km、流域面積3750km<sup>2</sup>であり、流域人口は約64万人である。

吉野川水系流域内の各自治体について求めた内外水リスクカーブについて、再帰期間ごとのリスク寄与率に基づいた類型化を行った結果を図3-18に示す。赤色の吉野川市は類型Aに、青色の石井町および神山町は類型Cに、灰色の市区町村は類型Bにそれぞれ属する。また、黄色の市区町村は、水害統計における検討対象期間の被害記録年数が10年未満であり、改良FD法による検討対象外の市区町村である。

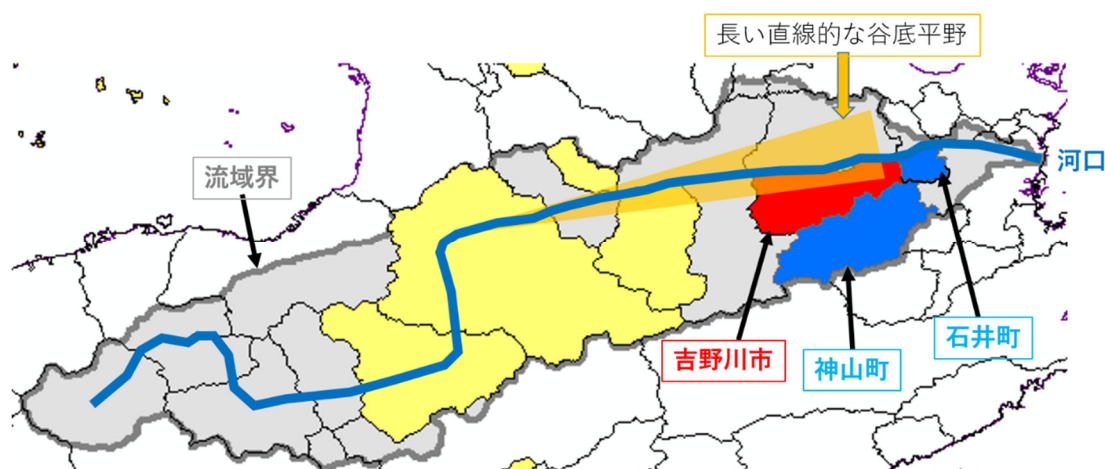


図 3-18 吉野川水系流域内の各自治体の確率的リスク特徴類型

本項では、谷底平野出口部の本川右岸側に隣接して存在している一方で、対称的な確率的リスク特性を示している、吉野川市と石井町に着目する。

吉野川市の改良FD法で求めた内外水リスクカーブを図3-19に示す。吉野川市は類型Aに属し、再帰期間50年~100年の低頻度大被害水害がリスクに最も寄与しない一方で、再帰期間10年~50年の中頻度中被害水害がリスクに最も寄与し、再帰期間10年未満の高頻度小被害水害もその次に寄与するという確率的リスク特性を持つ。図3-19の拡大図においても、年超過確率0.4付近から想定被害額が増大し始めること、および、全体図においても、年超過確率0.02以上、すなわち再帰期間50年以下の領域に対応するリスクカーブ左下領域の面積が大きいことが読み取れる。



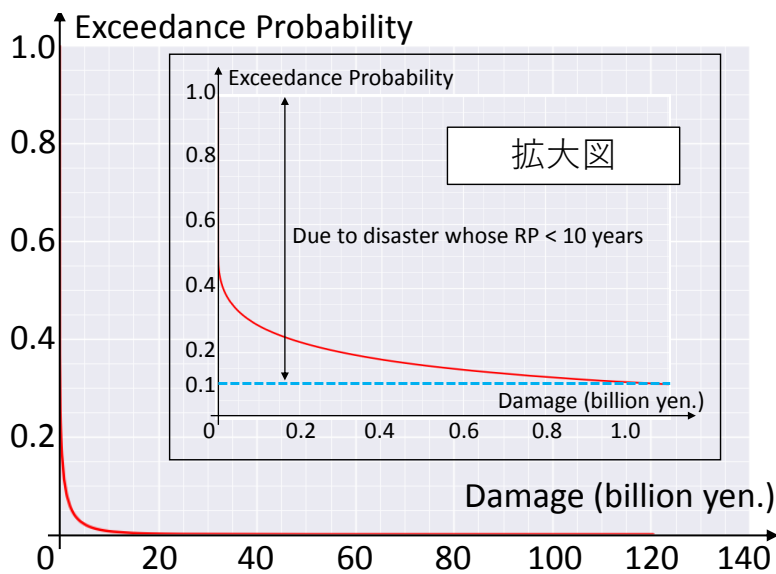


図 3-19 吉野川市の改良FD法による内外水リスクカーブ

一方で、石井町の改良FD法で求めた内外水リスクカーブを図3-20に示す。石井町は類型Cに属し、再帰期間50年~100年の低頻度大被害水害がリスクに最も寄与する一方で、再帰期間10年未満の高頻度小被害水害はリスクに最も寄与しないという確率的リスク特性を持つ。図3-20の拡大図において、想定被害額が増大し始めるのが年超過確率0.2付近と吉野川市に比して小さい値であることや、全体図において、年超過確率0.02以上、すなわち再帰期間50年以下の領域に対応するリスクカーブ左下領域の面積が小さいことが読み取れる。

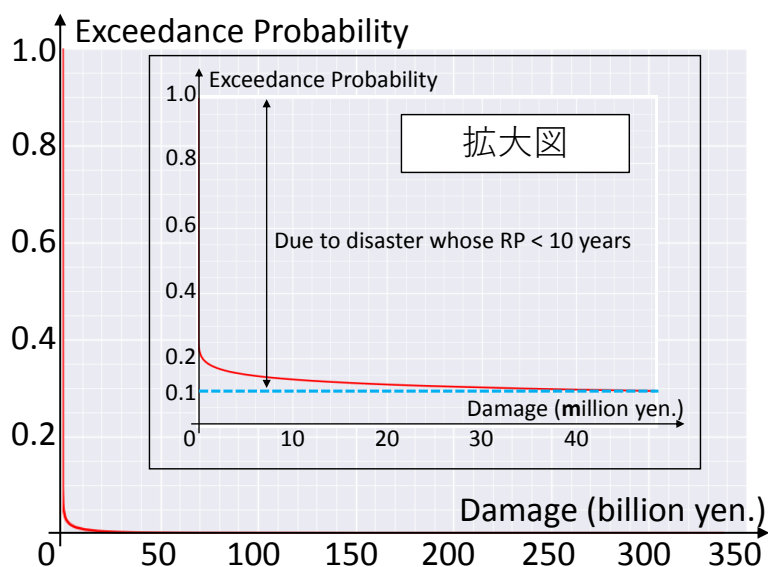


図 3-20 石井町の改良FD法による内外水リスクカーブ

先述の通り、吉野川市および石井町は本川右岸側の谷底平野出口部、本川右岸側を主な領域とする自治体であり、その領域は隣接している。このように、主な領域が同様の地形分類であり、互いに隣接している市区町村でも、対照的な確率的リスク特性をもちうる。

### 3-3-3. 流域内の自治体間の確率的リスク特徴の差異の例 ②：最上川水系

最上川は、山形県と福島県の県境である西吾妻山を源流とし、山形県のほぼ全域を流域としながら北流して日本海に注ぐ一級河川であり、一級水系最上川水系の本流である。本川の流路延長は229km、流域面積は7040 km<sup>2</sup>であり、流域人口は約96万人である。

最上川水系流域内の各自治体について求めた内外水リスクカーブについて、再帰期間ごとのリスク寄与率に基づいた類型化を行った結果を図3-21に示す。赤色の山形市や米沢市は類型Aに、青色の市区町村は類型Cに、灰色の市区町村は類型Bにそれぞれ属する。また、黄色の市区町村は、水害統計における検討対象期間の被害記録年数が10年未満であり、改良FD法による検討対象外の市区町村である。

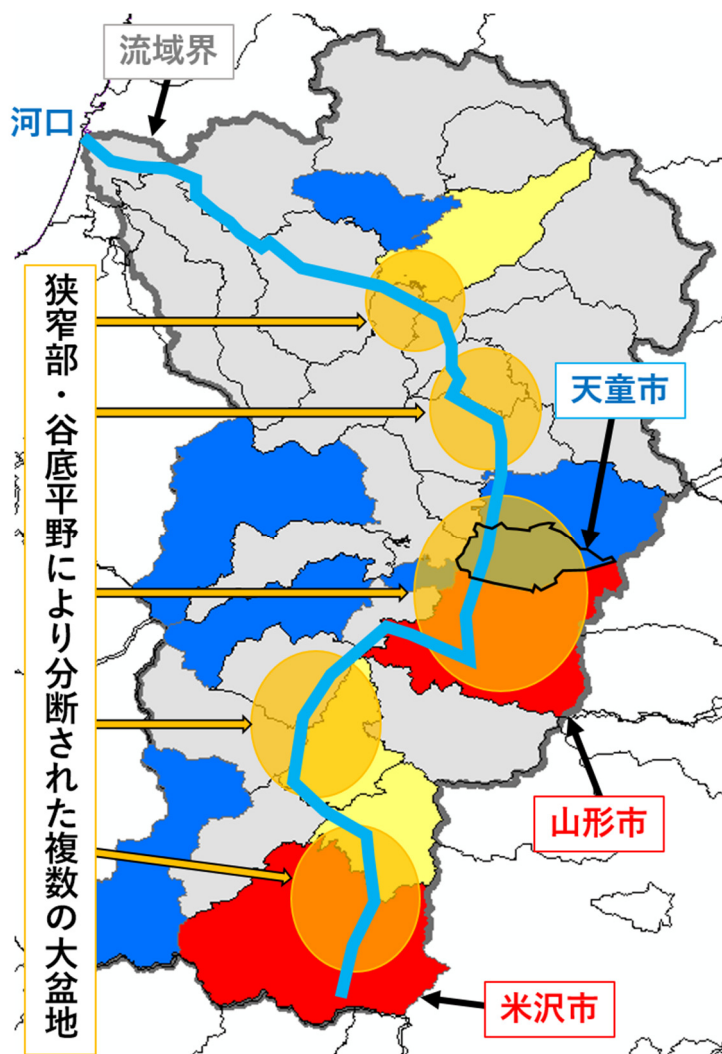


図 3-21 最上川水系流域内の各自治体の確率的リスク特徴類型

本項では、同一の盆地（村山盆地）を主要な領域とし、互いの領域が隣接しているにもかかわらず、対照的な確率的リスク特性を持つ、山形市と天童市に着目する。

山形市の改良FD法で求めた内外水リスクカーブを図3-22に示す。山形市は類型Aに属し、再帰期間50年~100年の低頻度大被害水害がリスクに最も寄与しない一方で、再帰期間10年~50年の中頻度中被害水害がリスクに最も寄与し、再帰期間10年未満の高頻度小被害水害もその次に寄与するという確率的リスク特性を持つ。図3-22の拡大図においても、年超過確率0.4付近から想定被害額が増大し始めること、および、全体図においても、年超過確率0.02以上、すなわち再帰期間50年以下の領域に対応するリスクカーブ左下領域の面積が大きいことが読み取れる。

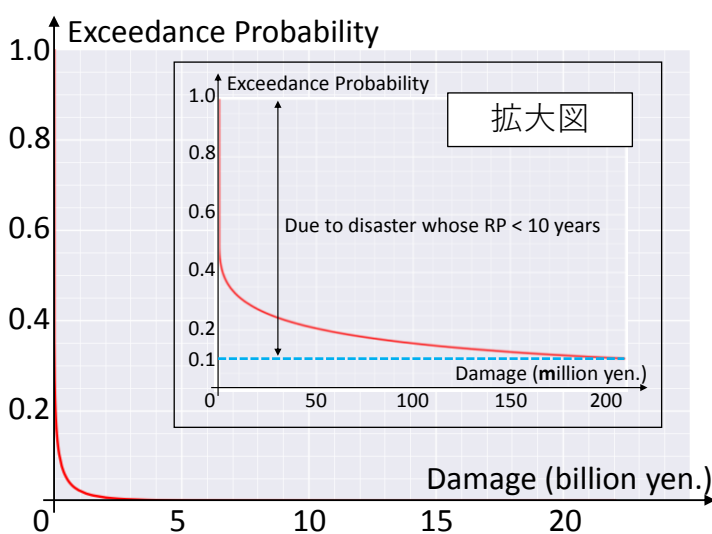


図3-22 山形市の改良FD法による内外水リスクカーブ

一方で、天童市の改良FD法で求めた内外水リスクカーブを図3-23に示す。石井町は類型Cに属し、再帰期間50年~100年の低頻度大被害水害がリスクに最も寄与する一方で、再帰期間10年未満の高頻度小被害水害はリスクに最も寄与しないという確率的リスク特性を持つ。図3-23の拡大図において、想定被害額が増大し始めるのが年超過確率0.15付近と吉野川市に比して小さい値であることや、全体図において、年超過確率0.02以上、すなわち再帰期間50年以下の領域に対応するリスクカーブ左下領域の面積が小さいことが読み取れる。

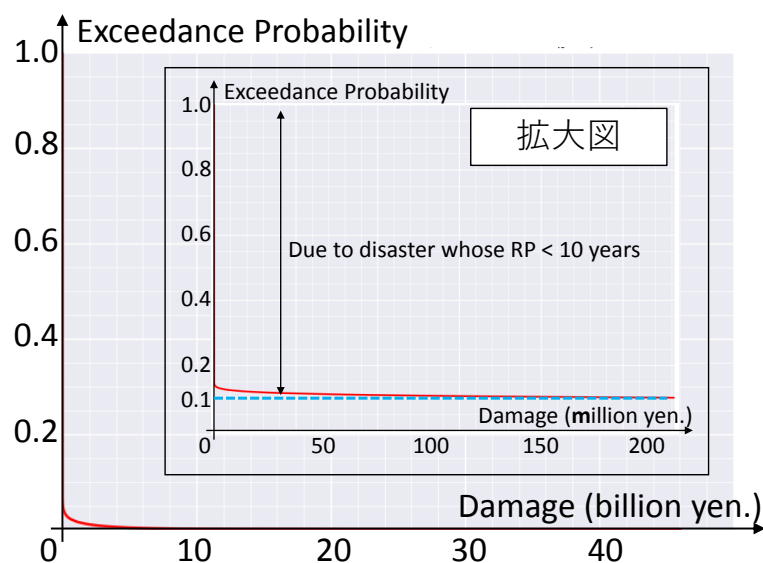


図 3-23 天童市の改良FD法による内外水リスクカーブ

先述の通り、山形市および天童市は最上川中流域に位置する村山盆地を主な領域とする自治体である。山形市が盆地の上流側、天童市が盆地の下流側という差異はあるものの、その領域は隣接しており、主な領域が同一の地形分類上に存在しているにもかかわらず、対照的な確率的リスク特性を持った市区町村であると言える。

#### 3-3-4. 自治体間の確率的リスク特徴の差異と中地形分類

前項・前々項で検討した通り、同一の流域内において、同一の中地形分類を主な領域とする隣接する市区町村についても、対照的な確率的リスク特性を持つ場合がある。市区町村スケールでの確率的リスク特性の要因を考慮する際には、地域スケールの地形地質的あるいは気候的条件による影響や、市区町村とほぼ同スケールか大きい程度の流域中地形分類の影響に加えて、市区町村より小スケールでの要因や、各市区町村の社会的条件に基づく要因も考慮する必要性が示唆された。

### 3-4. 本章のまとめ

本章では、我が国に2018年6月時点で存在する1741市区町村を対象とした水害リスクカーブの作成と比較を通じて、市区町村スケールでの確率的リスク特性の検討を行うことを目的とした。

回帰的に水害リスクカーブを算出する手法としては、第2章で用いたFrequency-Damage法が挙げられる。しかしながら、市区町村スケールでは、災害の記録が存在しない年、すなわち罹災世帯率  $F$  および平均損傷率  $D$  が0である年の割合が大きくなる一方で、従来のFD法は災害が発生しない年の存在を明示的に考慮できない。この課題を解消するため、筆者は災害が発生しない年の存在を明示的に考慮できる改良FD法を考案した。さらに、改良FD法が市区町村スケールに対して従来のFD法と比して高い適用性を持っていることを確認するために、市区町村スケールでの水害リスク評価の比較検討を行った。主な結果は以下である。

水害リスクの大きさの評価という観点から、改良FD法は、従来のFD法に比べて、平均年間被害額（実績値）に近いリスク期待値（被害額の期待値）を算出する傾向にある。平均絶対誤差率（MAPE）・平均平方自乗誤差率（RMSPE）の分析からも、改良FD法はリスク算出の精度が向上している。

水害リスクの確率的特徴の評価という観点から、改良FD法は、従来のFD法に比べて、算出したリスクカーブ形状と実績値曲線の近接性が高い傾向にある。すなわち、被害額と年超過確率の関係性として表される水害リスクの確率的特徴を、より適切に表現できる。以上より、改良FD法は、回帰的な水害リスクの評価手法として、評価精度および特徴の反映という観点から、小規模な地理的スケールへの適用可能性が高いことが示された。

続いて、改良FD法を用いて算出した市区町村スケールの内外水リスクカーブに基づき、我が国における市区町村スケールでの確率的リスク特性の多様性を検討した。再帰期間ごとのリスク寄与率に基づいた市区町村の類型化の結果、我が国の市区町村には、再帰期間50年~100年の低頻度大被害リスクが最も総リスクに寄与する市区町村の類型が存在する一方で、低頻度大被害リスクが最も総リスクに寄与せず再帰期間10年~50年の中頻度中被害リスクや再帰期間10年未満の高頻度小被害リスクが最も総リスクに寄与する市区町村の類型も存在することが示され、第2章の流域スケールと同様に、市区町村スケールでの確率的リスク特性の多様性を明らかにした。一方で、ある地域に特定の類型の市区町村が集中して存在することはなく、流域スケールの確率的リスク特性に見られたような地域性は、市区町村スケールでは観察されなかった。

市区町村スケールと同等程度の自然的条件として、河川流域の一般的な中地形分類に着目し、吉野川流域と最上川流域を例とした事例分析を行った結果、吉野川流域における谷底平野末端部の吉野川市・石井町や、最上川流域における村山盆地内の山形市・天童市など、同一の流域内において同一の中地形分類を主な領域とする隣接する市区町村についても、対照的な確率的リスク特性を持つ場合があることが明らかになった。市区町村スケールで

の確率的リスク特性の要因を考慮する際には、地域スケールの地形地質的あるいは気候的条件による影響や、市区町村とほぼ同一スケールか大きい程度の流域中地形分類の影響に加えて、市区町村より小スケールでの要因や、各市区町村の社会的条件に基づく要因も考慮する必要性が示唆された。



## 第4章 地先の水害リスクの算出と地理的構造化手法の提案

本章ではまず、吉野川中下流部の2自治体を事例分析の対象地として選択し、大規模降雨アンサンブルデータ d4PDF を用いた反復氾濫解析を適用することで、領域内の各点での地先の水害リスクカーブおよび水害ハザードカーブを算出する。(4-1~4-3)

続いて、算出された各点における水害リスクカーブ・水害ハザードカーブそれぞれの形状に表される確率的リスク特性・確率的ハザード特性の類似性から、対象領域内部を地理的に構造化する手法を2種類提案する。第一の手法はカーブ自体のクラスタリングであり、第二の手法は前章においても用いた再帰期間ごとのリスク寄与率による類型化である。それぞれの手法の長所・短所と、適用可能範囲についても検討する。(4-4)

最後に、経時的に共通である水害ハザードカーブに対するクラスタリングによる地理的構造化の結果と、2014年時点での土地利用に基づく水害リスクカーブに対する再帰期間ごとのリスク寄与率類型化による地理的構造化の結果を検討し、それぞれの手法による流域の構造化が妥当であることを検証する。(4-5~4-6)

### 4-1. 検討対象領域の概要

前章において、吉野川流域下流部の吉野川市および石井町に関する改良FD法による内外水リスクカーブの比較を通じて、主な領域が同様の地形分類であり、互いに隣接している市区町村でも、対照的な確率的リスク特性を持ちうることを指摘した。本章では引き続き、これら2自治体を検討対象自治体として選択する。

本節では、吉野川流域全体の概要や、過去の出水被害について概観した後、それぞれの自治体の地理的条件を述べる。続いて、実際に氾濫計算を行う計算フレームの設定を説明する。

#### 4-1-1. 吉野川水系の概要

吉野川水系は高知県吾川郡瓶ヶ森を源流とし、概ね東西に細長い流域形状を持つ四国の一級水系である。本川の総延長は194km、流域面積は3750km<sup>2</sup>である[61]。流域は山地溪流部(源流~池田)、段丘面に挟まれた狭隘な谷底平野部(池田~岩津)、支川扇状地より影響を受ける幅広の谷底平野部(岩津~川島)、発達した蛇行平原およびデルタ部(川島~河口)に概ね区分される。流域全体の概要を図4-1に示す。





図 4-1 吉野川水系流域概要[61]

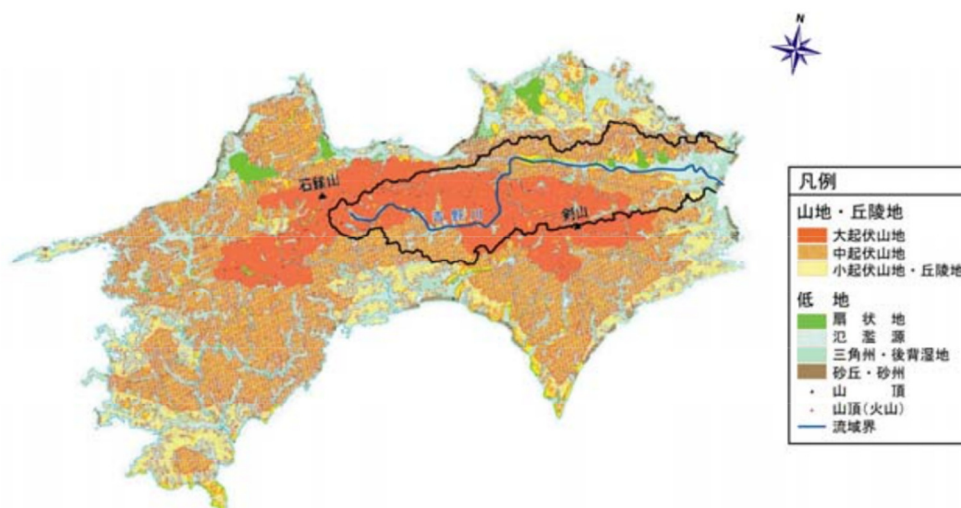


図 4-2 吉野川水系流域の地形概要[61, 62]

本川の下流部に見られる平野を除き約 9 割の領域は山地（3270 km<sup>2</sup>）であり，県庁所在地である徳島市を始めとして人口・資産が狭い平野に集中している．山地地形は谷底平野南部と谷底平野北部で差異があり，南側の剣山地は剣山を最高峰とした急峻な大起伏山地である一方，北部の阿讃山脈は緩やかな中起伏山地である．吉野川の地形の概要を図 4-2 に示す．池田より下流の直線的な谷底平野は中央構造線に沿って形成されたものである[63]．

流域の地層構成として，中央構造線北部の阿讃山脈については，北側は花崗岩帯，南側は砂岩・頁岩混合の和泉層群により構成されている．吉野川流域に含まれるのは主に南側の和泉層群であり，断層帯である．一方で，中央構造線南部の剣山地については，北から順に三波川変成帯，秩父帯が連なっており，慢性地すべりが多発する領域となっている．四国地方の地質の概要図を図 4-3 に，吉野川流域との重ね合わせおよび地すべり分布を図 4-4 に示す．

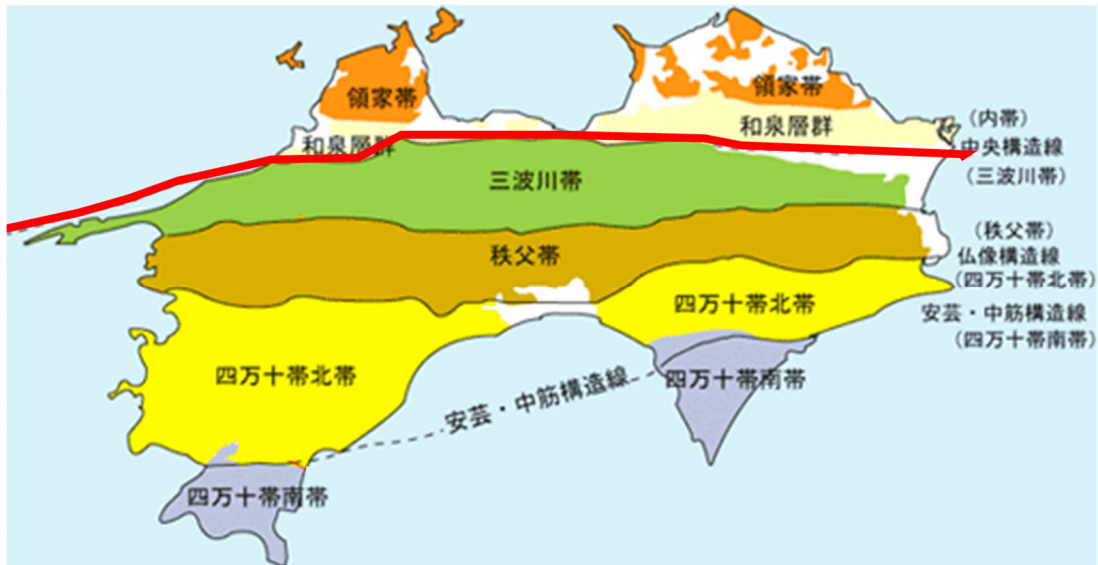
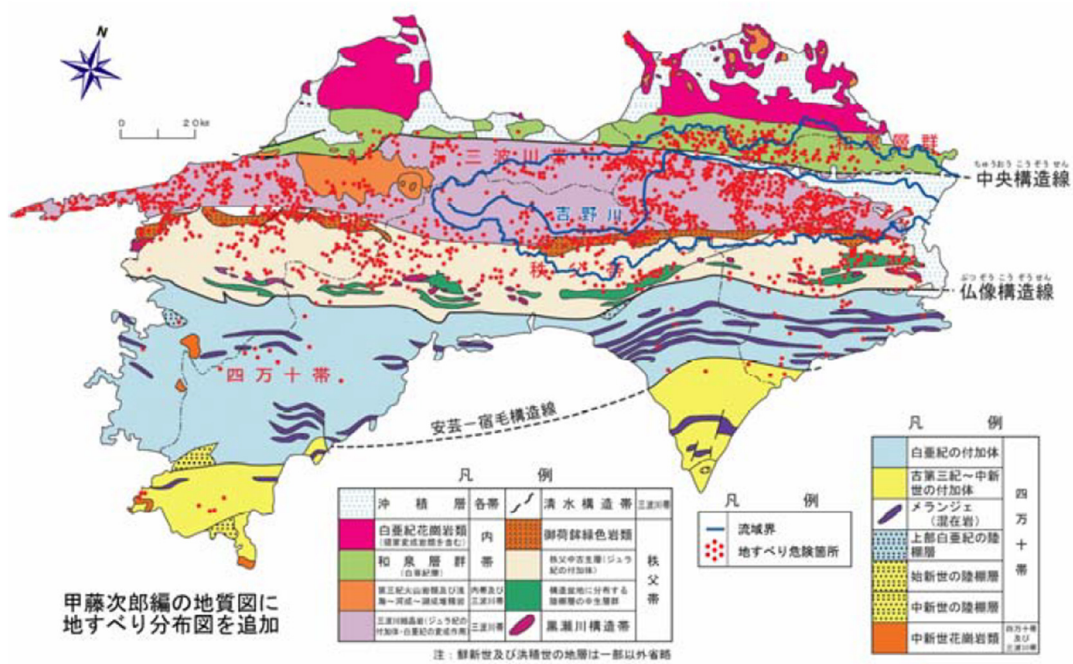


図 4-3 四国地方の地質概要図 ([64]を筆者編集)



※甲藤次郎編の四国の地質図に地すべり分布を加える。

図 4-4 吉野川流域の地質および地すべり分布図[61]

#### 4-1-2. 吉野川水系における過去の水害

吉野川水系においては、昭和2年に岩津下流区間における本川の堤防が概成して以降は、本川堤防からの決壊や越水は記録されていない。一方で、池田岩津間の無堤区間ではたびたび本川溢水による浸水が生じているほか、池田下流部においても支川外水や内水による氾濫が頻繁に生じている。本川流量に着目した場合、観測史上最大の洪水は平成16年10月の台風23号に伴う出水である。流域のほぼすべての雨量観測所で2日間雨量400mm～500mmを記録し、基準地点である岩津における最大流量は16400m<sup>3</sup>/sであった。この出水により、池田岩津間の無堤区間で外水氾濫による浸水が、岩津下流部の堤防整備済み区間においても主要支川（飯尾川等）の氾濫による浸水が生じた。浸水面積は旧吉野川流域を除いても7645ha、浸水個数は床上・床下合わせて2720戸であったと記録されている[61]。この出水の詳細については氾濫解析モデルの校正の節で述べる。また、昭和期以降の主要な洪水および被害について表4-1に示す。

#### 4-1-3. 対象市区町村の概要

本章において検討対象とするのは、徳島県吉野川市、および徳島県名西郡石井町の2自治体である。吉野川流域における2自治体の位置を図4-5に示す。

吉野川市は面積144.14km<sup>2</sup>、総人口約4万人（2018年4月）の自治体であり、2004年に鴨島町・川島町・山川町・美郷村の3町1村の合併により誕生した[65]。吉野川流域の下流部、谷底平野末端部から蛇行平原の開始部にかけて東西に細長い領域を持ち、北側境界は吉野川本川、南側境界は剣山地の尾根である。合併前自治体のうち、山川町・川島町は谷底平野部に、鴨島町は蛇行平原部に、美郷町は山地に位置する。

石井町は面積28.85km<sup>2</sup>、総人口約2.6万人（2018年4月）の自治体であり、1955年に旧石井町・浦庄村・高原村・藍畑村・高川原村の1町4村の合併により誕生した[66]。北側を吉野川本川に接し、ほぼ正方形の領域を持つ。領域全体が蛇行平原部に属し、吉野川市とは対比的に山地はほぼ含まない。南側境界部に標高約200m程度の剣山地の末端部が存在するのみである。

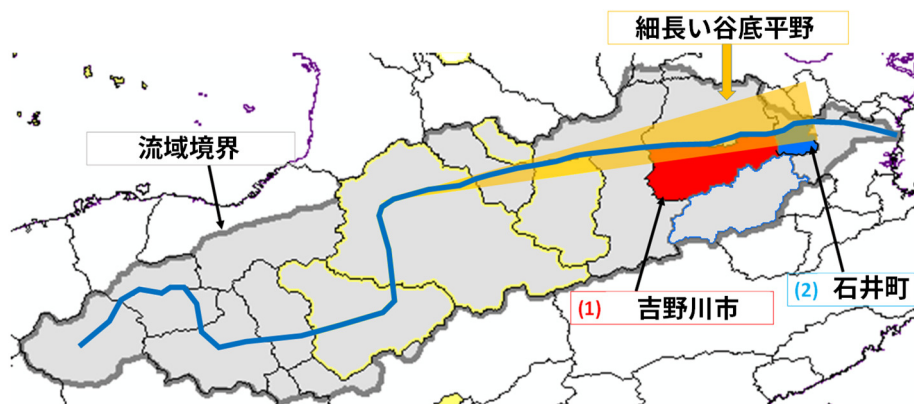


図 4-5 吉野川水系における対象自治体の位置



表 4-1 吉野川における昭和以降の主要な洪水および被害[61]

洪水発生年月日		要因	岩津上流 流域平均 2日雨量 (mm)	岩津 最大流量 (m <sup>3</sup> /s)	被害・概要等
西暦	洪水日				
1934	昭和9年 9月	室戸台風	216	不明	死者37名、負傷者345名、不明者2名。
1945	昭和20年 9月	台風16号 (枕崎)	287	(約14,700)	池田町等で死者12名。
1954	昭和29年 9月14日	台風12号 (ジューン)	337	(約15,000)	死傷者17名、 床上浸水2,059戸、床下浸水6,886戸。
1961	昭和36年 9月16日	台風18号 (第2室戸)	318	約12,000	浸水面積6,638ha、 床上浸水15,462戸、床下浸水9,702戸。
1970	昭和45年 8月21日	台風10号	326	約12,800	浸水面積6,187ha、 床上浸水828戸、床下浸水6,507戸。
1974	昭和49年 9月 9日	台風18号	329	約14,500	浸水面積3,144ha、 床上浸水362戸、床下浸水2,439戸。
1975	昭和50年 8月18日	台風 5号	349	約10,500	各所で護岸・根固等が被災。 ※被害状況は台風6号に含む
	昭和50年 8月23日	台風 6号	336	約13,900	浸水面積7,870ha、 床上浸水1,679戸、床下浸水10,139戸、 全壊流失家屋75戸。
1976	昭和51年 9月12日	台風17号	578	約11,400	床上浸水3,880戸、床下浸水25,713戸、 全壊流失家屋109戸。 (旧吉野川は浸水面積6,186ha、床下浸水1,503戸。)
1982	昭和57年 8月27日	台風13号	315	約11,100	浸水面積38ha、 床上浸水1戸、床下浸水12戸。
1990	平成 2年 9月19日	台風19号	336	約11,200	吉野川は浸水面積1,574ha、 床上浸水 37戸、床下浸水319戸。 (旧吉野川は浸水面積260ha。)
1993	平成 5年 7月28日	台風 5号	421	約12,100	浸水面積158ha、 床上浸水39戸、床下浸水243戸。 ※台風7号の被害を含む
	平成 5年 8月10日	台風 7号	253	約10,600	池田から岩津間の無堤地区で氾濫被害、 下流部の飯尾川等で内水被害。 ※被害状況は台風5号に含む
1997	平成 9年 9月17日	台風19号	247	約10,000	浸水面積142ha、 床上浸水1戸、床下浸水13戸。
2004	平成16年 8月31日	台風16号	279	約13,600	池田から岩津間の無堤地区で氾濫被害、内水地区で 浸水被害。 浸水面積757ha、床上浸水92戸、床下浸水139戸。
	平成16年 9月29日	台風21号	265	約10,100	吉野川は浸水面積362ha、 床上浸水5戸、床下浸水12戸。 (旧吉野川は、浸水面積72ha、床上浸水1戸、 床下浸水8戸)
	平成16年10月20日	台風23号	366	約16,400	戦後最大の洪水。 吉野川は浸水面積7,645ha、 床上浸水745戸、床下浸水1,975戸。 (旧吉野川は浸水面積3,120ha、床上浸水139戸、 床下浸水457戸。)
2005	平成17年 9月7日	台風14号	505	約13,800	吉野川は浸水面積 666ha、 床上浸水19戸、床下浸水111戸。

#### 4-1-4. 計算対象フレームの概要

地先の水害リスクカーブを算出する氾濫解析の計算対象フレームとして、前項において述べた吉野川市・石井町の2自治体が含まれる領域を選択する。このとき、氾濫解析の簡略化のために、計算対象フレームの境界においては地表流水の流入・流出がないことが望ましい。本章では、吉野川本川右岸側の図4-6に示す東西約41km、南北約16kmの赤枠領域を計算対象フレームに設定した。また、計算対象フレーム内における自治体境界を図4-7に示す。



図 4-6 計算対象フレームの境界部

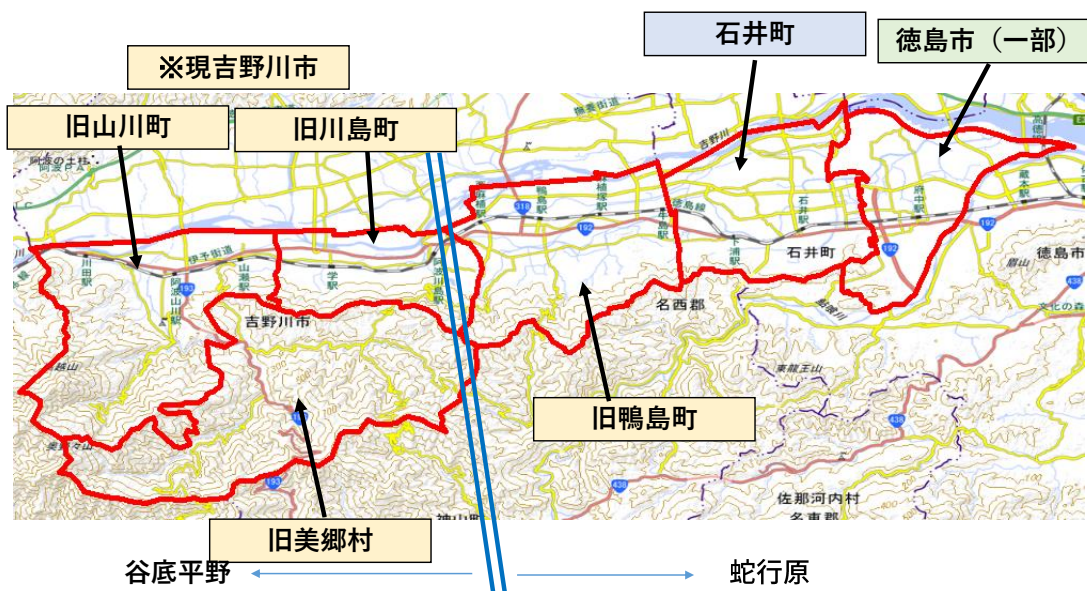


図 4-7 計算対象フレーム内の自治体境界



計算フレーム北西端は岩津狭窄部であり、吉野川本川と南部の山体が接している。この地点から東に吉野川本川右岸の堤防を辿ったラインを計算対象フレームの北側境界とした。また、岩津狭窄部から南へと尾根筋を辿ったラインを計算対象フレームの西側および南側境界とした。計算対象フレームの東部境界は、吉野川の右支川である鮎喰川の左岸堤防により設定した。これらの境界を越えての地表流水のやり取りはない。また、河道内の流水のやり取りについては、後述の境界条件設定部にて詳述する。

## 4-2. 氾濫解析モデルの概要・較正および反復氾濫計算の実施

### 4-2-1. RRI モデルの概要

本章で行う氾濫解析には、Sayama et al.らにより開発された Rainfall-Runoff-Inundation モデル、通称 RRI モデルを使用する[67]。RRI モデルの全体像をに示す。

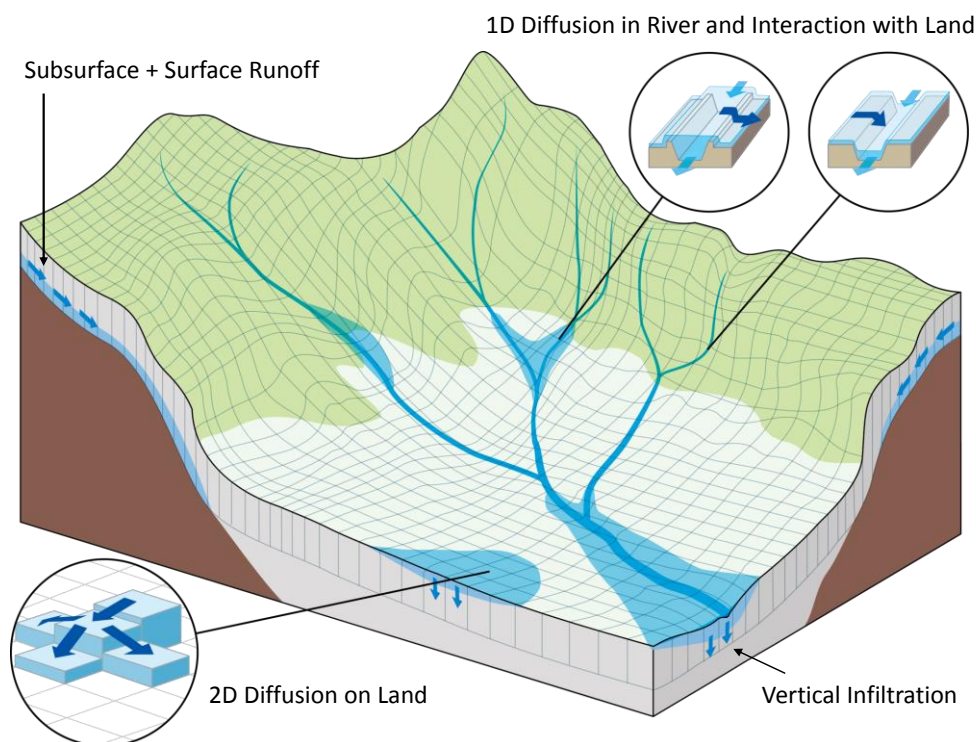


図 4-8 RRI モデルの構造[67]

数ある氾濫解析モデルから RRI モデルを選択する理由は主として 3 点ある。

第一に、本研究では d4PDF に基づく降雨アンサンブルデータを用いた反復氾濫解析を行うため、降雨データを入力として扱うことができるモデルが適切であった。RRI モデルは降雨分布を入力として、流域での流出現象、河道内での洪水流流下、そして氾濫原での浸水を一貫して解析することができるという長所がある。

第二に、反復氾濫解析を行う上で計算負荷が小さいモデルが適切であった。RRI モデルは拡散波近似された浅水方程式を基礎方程式として用いるため、氾濫水の挙動を運動方程式に基づいて解析しているものの、一般に用いられる二次元不定流モデルと比べて計算負荷が小さい。一方で、氾濫水の物理的挙動自体を単純化している Yamazaki et al.らや安田らのモデルは、RRI モデルと比べて更に計算負荷が小さい一方で、浸水深分布の地理的分布の再現性が担保されない[68, 69].

第三に、本研究では築堤河道からの越水・破堤による外水氾濫ではなく、掘り込み河道からの外水氾濫および内水氾濫を主な分析対象としているため、内水・外水を連続的に解析できるモデルが適切であった。RRI モデルは河道・氾濫原間の水のやり取りを考慮しているため、解析対象とする物理的現象をより適切に再現できると考えられる。

RRI モデルの氾濫原セルにおいては、連続式および二次元浅水方程式を拡散波近似した運動方程式が基礎式として用いられる。また、河道においては、連続式および一次元浅水方程式を拡散波近似した方程式が基礎式として求められる。二次元での基礎式を以下に示す。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = r - f \quad \dots\dots \text{式(4-1)}$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial uq_x}{\partial x} + \frac{\partial vq_x}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho_w} \quad \dots\dots \text{式(4-2)}$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial uq_y}{\partial x} + \frac{\partial vq_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho_w} \quad \dots\dots \text{式(4-3)}$$

式(4-1)から式(4-3)において、 $h$ は水深、 $u, v$ はそれぞれ $x, y$ 方向の流速、 $q_x, q_y$ はそれぞれ $x, y$ 方向の流量、 $H$ は基準面から自由水面までの比高、 $\tau_x, \tau_y$ はそれぞれ $x, y$ 方向の底面剪断応力、 $r$ は降雨量、 $f$ は鉛直浸透による損失量、 $\rho_w$ は水の密度である。なお、拡散波近似により、式(4-1)および式(4-3)の左辺慣性項は無視される。

氾濫原セルにおける土壌への浸透・流出過程は、鉛直浸透のみで不飽和浸透流は生じないパターンと、浸透後に側方不飽和浸透流が生じるパターンのどちらかを選択する事となる。土壌への浸透については Green-Ampt モデルが採用されている。

河道と氾濫原セルの間の水の交換は、河道内水面高さ・氾濫原水面高さ・堤防高さの3つの値の大小関係に基づき段落ち式と越流公式のどちらかに基づいて算出される。これら3つの変数の大小関係は図 4-9 に示す4つにパターン化される。

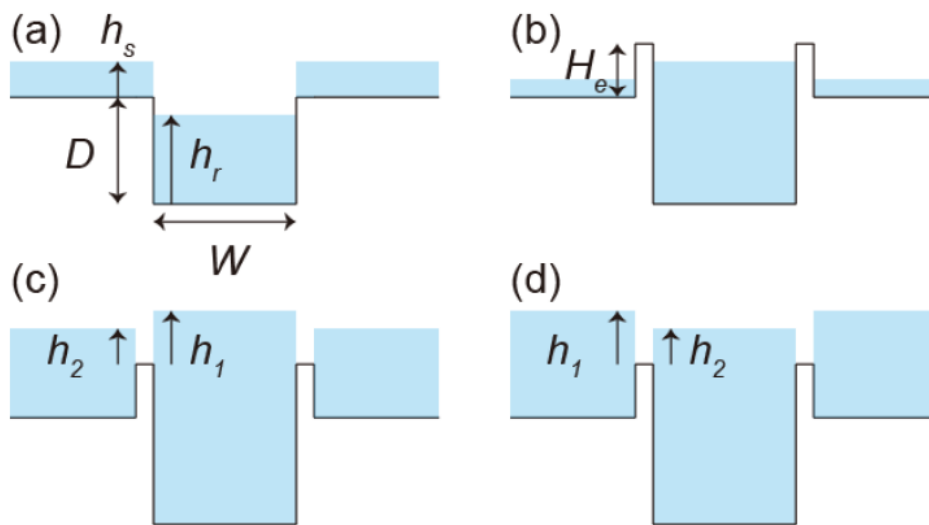


図 4-9 RRI モデルにおける河道と氾濫原の水位のパターン[70]

パターン(a)については段落ち式が，パターン(c)およびパターン(d)では越流公式が用いられる．なお，パターン(b)については，河道と氾濫原セルの間で水のやり取りは行われず，段落ち式を式(4-4)に，越流公式を式(4-5)に示す．

$$q_{s \rightarrow r} = \mu_1 h_s \sqrt{gh_s} \quad \dots\dots \text{式(4-4)}$$

$$q_{interaction} = \begin{cases} \mu_2 h_1 \sqrt{2gh_1} & \text{if } h_2/h_1 \leq 2/3 \\ \mu_3 h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} & \text{else.} \end{cases} \quad \dots\dots \text{式(4-5)}$$

なお，具体的な離散化手法等については，Sayama et al.および RRI Manual を参考されたい[67, 70]．

#### 4-2-2. 本川・支川合流部での境界条件の設定

前節において設定した計算対象フレームは，外部との間で地表流水の流入・流出が存在しない境界を設定した．一方で，北部境界である吉野川本川に対し，計算対象フレーム内部を流れる支川が堤防を水門で通過して流入する箇所が合計 7 箇所存在し，これらの地点においては，支川末端部の境界条件を設定する必要性が生じる．該当地点を図 4-10 に示す．なお，図 4-10 において河道セルは白線で示されている．



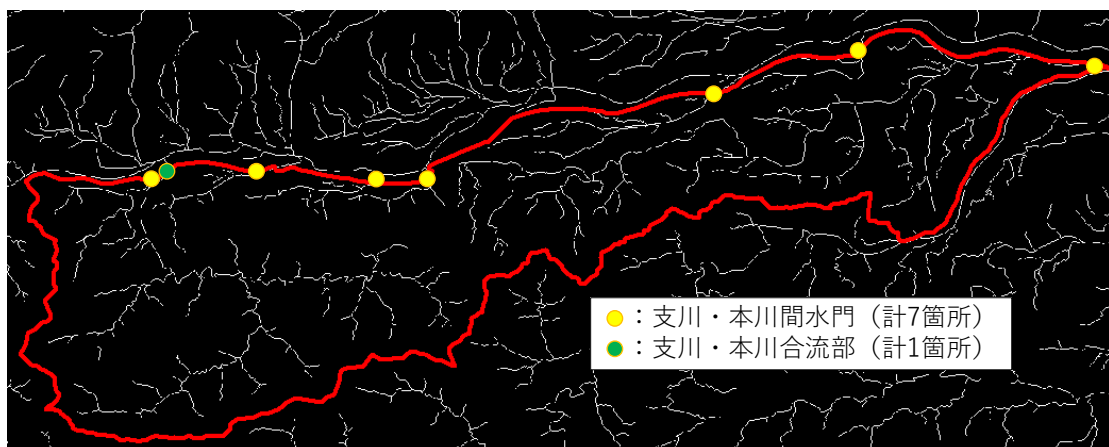


図 4-10 本川・支川合流地点

支川末端部の境界条件を設定するためには、各時刻における各合流点での本川水位の情報が必要となる。本研究では、吉野川流域全体での RRI モデルを用いた流出計算により、氾濫計算を行う前に本川水位を予め求めておき、その値に従って以下の条件で境界条件を設定することとする。なお、流出計算の詳細については後述する。

緑色のプロットで示した支川・本川合流部は、築堤済みの支川である川田川のものである。この合流部においては、支川堤防と本川堤防が接続されており、水門は存在しない。この合流部においては、流出計算で求めた本川水位そのものを川田川の合流部河道セルにおける下流端水位条件として与える。

黄色のプロットで示した支川・本川合流部は、無堤支川が本川堤防に設けられた水門を介して本川に合流している。これらの地点においては、本川水位が大きい場合には水門を閉じる操作が行われ、この操作を再現する境界条件設定が求められる。本研究では、流出計算の結果の各合流点における本川水位が、水門直上流の河道セルが含まれる氾濫原セルの地盤高を上回った場合に、水門が存在する河道セルの下流端流量条件を 0 とすることで、水門の閉鎖を再現している。

#### 4-2-3. 使用データの概要

RRI モデルを用いた流域全体スケールでの流出計算および氾濫計算の設定および使用データの概要を表 4-2 に示す。

流出計算においては、基盤地図情報 5m/10m メッシュ数値標高モデルを 300m グリッドサイズまでアップスケールして使用した。また、吉野川水系においては池田ダム（ピークカット方式）、早明浦ダム（一定率一定量方式）、豊郷ダム（一定率一定量方式）、柳瀬ダム（自由越流一定量方式）、新宮ダム（単純一定量方式）の 5 ダムが存在するが、洪水期の洪水調節容量および計画放流量を用いた単純一定量方式として再現した。キャリブレーションの詳細や最終的なパラメタ設定については後述する。

表 4-2 流出計算・浸水計算での使用データ概要

	流出計算	浸水計算
グリッドサイズ	300m×300m	30m×30m
タイムステップ	河道：60s 氾濫原：600s	河道：6s 氾濫原：60s
流出形式	山地部（H18土地利用：森林）：不飽和浸透流 平野部（H18土地利用：それ以外）：鉛直浸透流のみ	
較正対象データ	較正：2004年10月 台風23号 流量ヒドログラフ（池田・岩津） 検証：2014年10月 台風11号 流量ヒドログラフ（池田・岩津）	2004年10月 台風23号 対象領域内浸水範囲
DEM	国土地理院 基盤地図情報数値標高モデル 5mメッシュ/10mメッシュ	衛星画像による水域補正を行った 数値標高・流向データ (30mメッシュ)
降水データ	d4PDF 現在気候20kmメッシュ1時間降雨データを アメダス観測点に関してバイアス補正したもの1500年分	
河道断面形状	河川整備基本方針・河川整備計画・河川維持管理計画および 現地観測データを元に矩形断面近似	
土地利用データ	国土数値情報 土地利用細分メッシュデータ H26・H18・H9・H3・H62・H51	
土地利用別資産評価額		治水経済評価マニュアル（案） 各種公開統計
土地利用別浸水深被害率関数		治水経済評価マニュアル（案）
ダム諸元	各ダム管理事務所HPおよびダム便覧	

浸水計算においては、山崎らの衛星画像による水域補正を行った 30m グリッドの数値標高・流向データを利用した[71]。キャリブレーションは浸水範囲の再現性に基づき行った。また、土地利用別の資産評価額の算出は治水経済評価マニュアルに基づき、各種公開統計に基づいて行った。これらについては後述する。

#### 4-2-4. d4PDF に基づく解析対象の降雨の抽出

水害リスクカーブを算出するためには、多数の降雨パターンに基づく流出・氾濫解析を行う必要がある。「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース (database for Policy Decision making for Future climate change, d4PDF)」は仮想的な気候データセットであり[72, 73]，日本周辺領域では，20km メッシュの高解像度領域大気モデルの出力として，現在海面温度条件の 3000 仮想年分が利用可能である。

本研究では，渡部らによる，d4PDF の降雨メッシュデータをもとにアメダス観測点を対象としてバイアス補正を施した 1500 年分の 1 時間降雨量データセットを降雨アンサンブ

ルデータとして利用する[74]. この現在気候再現降水量データにおいては, 1 アンサンブル実験について 30 年間の継続降雨データが合計 50 アンサンブル実験分含まれる.

降雨アンサンブルデータに含まれる各年で, 対象領域の各セルに関する年最大浸水深を求める必要がある. しかし, 全年で1月1日から12月31日までの流出・氾濫解析を行うことは計算負荷の側面から現実的ではない. 我が国の河川計画において基本高水や計画洪水を決定する際には, 流域の計画降雨継続時間に基づいて年最大雨量と年超過確率の関係を求めたのち, 計画規模の年超過確率と対応する計画降雨継続時間雨量を決定し, その雨量となる複数の降雨パターンに関する流出計算を行っている. したがって, 流域全体を対象とする場合には, 予め定められた計画降雨継続時間に関する年最大雨量を生じさせる降雨事象を降雨アンサンブルデータの各年から抽出して行う流出・氾濫解析の結果を, 対象領域の各セルに関する年最大浸水深と概ね見なすことができると考えられる. この考え方によって, 立川らは計画降雨継続時間に関する年最大雨量から年第三位雨量までの降雨事象に関する流出計算を行い, アンサンブルデータから年最大流量の確率分布を算出している[75].

しかしながら本章の計算対象フレームは吉野川流域の一部であり, 計画降雨継続時間が定められていないため, 上述の手法を用いることは出来ない. そこで本研究では, ①複数の降雨継続時間に関して, それぞれ計算対象フレーム内に年最大降雨をもたらす降雨事象を降雨アンサンブルデータの各年から抽出して流出・氾濫解析を行い, ②各年について各セルの年最大浸水深を求める. この手順に概要を図 4-11 に示す.

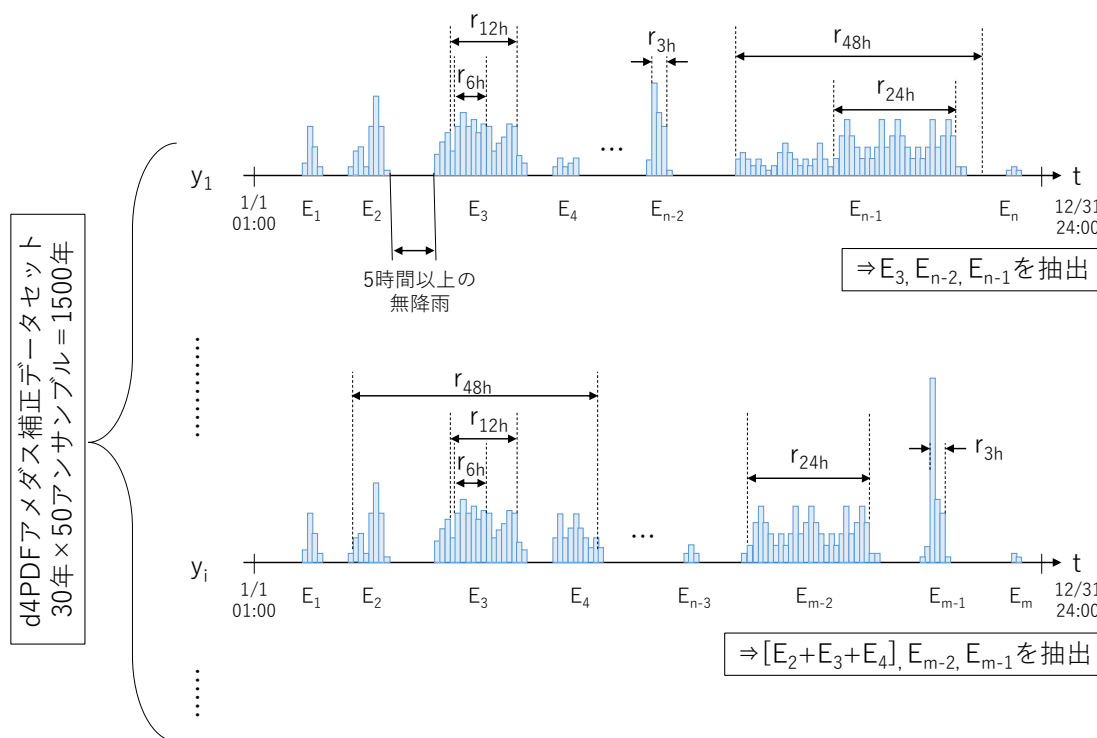


図 4-11 流出・氾濫解析を実施する降雨事象の抽出手法

降雨アンサンブルデータの各年について、流出・氾濫解析を実施する降雨事象を抽出する手順の詳細は以下の通りである。

1. 降雨アンサンブルデータの各年について、5時間以上の無降雨を区切りとして、降雨事象を切り分ける。
2. 年頭から年末にかけて、3時間・6時間・12時間・24時間・48時間の5種類の降雨継続時間に対する年最大降雨量を氾濫計算の計算対象フレームにもたらず時間帯と、その時間帯が含まれる降雨事象を検出する。
3. 1つの降雨事象が複数の降雨継続時間に関する年最大降雨量をもたらす場合、その降雨事象が双方の降雨継続時間を代表していると見なす。一方で、複数の降雨事象を跨いで年最大降雨量をもたらされる場合、それらの降雨事象をまとめて一つの降雨事象と見なす。
4. 検出されたすべての降雨事象を、流出・氾濫解析の対象とする。

例として、図4-11の仮想年 $y_1$ については、3時間の降雨継続時間に対する年最大降雨量を降雨事象 $E_{n-2}$ が、6時間および12時間の降雨継続時間に対する年最大降雨量を $E_3$ が、24時間および48時間の降雨継続時間に対する年最大降雨量を $E_{n-1}$ がそれぞれもたらしている。流出・氾濫解析の対象は降雨事象 $E_3$ 、 $E_{n-2}$ 、 $E_{n-1}$ である。一方で、図4-11の仮想年 $y_2$ については、3時間の降雨継続時間に対する年最大降雨量を降雨事象 $E_{m-1}$ が、6時間および12時間の降雨継続時間に対する年最大降雨量を $E_3$ が、24時間の降雨継続時間に対する年最大降雨量を降雨事象 $E_{m-2}$ がもたらしている。一方で、48時間の降雨継続時間に対する年最大降雨量は、3つの降雨事象 $E_2 \cdot E_3 \cdot E_4$ にまたがる時間帯でもたらされている。この場合、3つの降雨事象 $E_2 \cdot E_3 \cdot E_4$ は1つの降雨事象 $[E_2 + E_3 + E_4]$ として結合され、12時間の降雨継続時間に対する年最大降雨量もまたこの降雨事象 $[E_2 + E_3 + E_4]$ からもたらされることとなる。従って、流出・氾濫解析の対象は降雨事象 $[E_2 + E_3 + E_4]$ 、 $E_{m-2}$ 、 $E_{m-1}$ となる。

対象として抽出されたそれぞれの降雨事象について流出・氾濫解析を行うことで、各降雨事象に関する浸水計算の計算対象フレームの各セルでの最大浸水深が求まる。各仮想年に関して、その仮想年について行った全浸水計算での各セルの最大浸水深の最大値を求めることで、各セルの年最大浸水深が算出される。

上述の手順を用いることにより、最も出水や浸水と関連性が高い降雨継続時間があらかじめ知られていない場合でも、対象領域の各セルに関する概ねの年最大浸水深を求めることができると考えられる。

なお、検討に用いる降雨対象時間として3時間・6時間・12時間・24時間・48時間を選択した理由は、吉野川流域全体の計画降雨対象時間が2日（午前0時～二日後の午前0時までの48時間）であること、および、影山らによる研究から、今回の計算対象フレームとほぼ同程度の面積を持つ肱川流域において、洪水流量と降雨量の最も相関性が高い降雨継続時間が約3時間であることが指摘されていることである[76]。

#### 4-2-5. 流出計算のキャリブレーション

前項で述べた手順により抽出した降雨事象のそれぞれについて、まずは吉野川流域全体での流出計算から本川水位を算出し、これを氾濫計算における境界条件として用いることとなる。本項では、流出計算に用いる RRI モデルのキャリブレーションについて述べる。

流出計算については 300m グリッド解像度で行う。一方で、利用する元データの DEM は 5m グリッドもしくは 10m グリッドであるため、300m グリッドに平均値によるアップスケールを行った。アップスケール後の DEM を図 4-12 に示す。

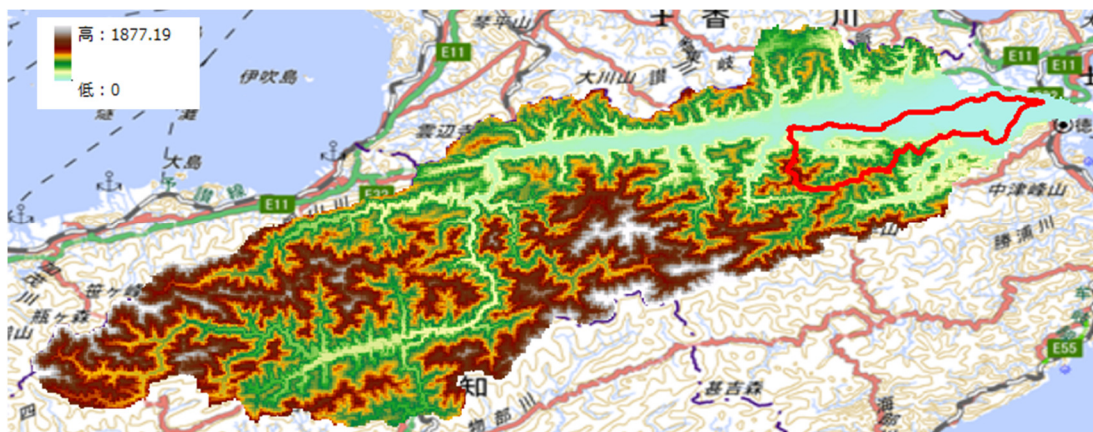


図 4-12 流出計算領域の 300m メッシュ DEM

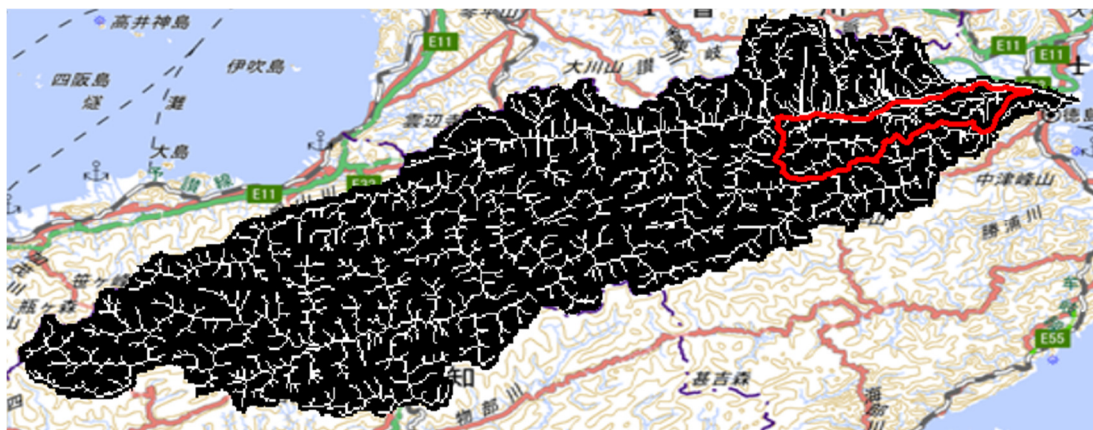


図 4-13 流出計算領域の河道網

アップスケール後の DEM を用い、集水域面積が 1 km<sup>2</sup> 以上のセルについては河道を割り当てた。河道網図 4-13 を示す。各河道セルにおける河道断面は、レジーム則に基づき以下の式を用いて設定した。なお、 $A$ [km]は該当河道セルの集水面積、 $c_*$ と $s_*$ はパラメタである。

$$\text{width}[m] = c_w A^{s_w} \quad \dots\dots \text{式(4-6)}$$

$$\text{depth}[m] = c_d A^{s_d} \quad \dots\dots \text{式(4-7)}$$



流域各点の本川河道断面情報から、流出計算においては $c_w = 1.7$ ,  $s_w = 0.7$ ,  $c_d = 1.4$ ,  $s_d = 0.3$ の値を用いる。また、河道堤防高については、池田より下流部で実際の堤防高を用いた。

RRIモデルにおいて、降雨後の水が土壌へ浸透・流出する過程は、鉛直浸透のみで不飽和浸透流は生じないモデルと、浸透後に側方不飽和浸透流が生じるモデルのどちらかを選択する事となる。吉野川流域の山地部は森林に覆われているため、森林域については浸透後に側方不飽和浸透流が生じるモデルを採用した。一方で、非森林域については鉛直浸透流のみのモデルを採用した。森林域の分類は、国土数値情報土地利用分類細分メッシュ（2014）の100mグリッドデータを300mグリッドまで最頻値法でアップスケールした後、土地利用が「森林」であるセルを森林域、それ以外のセルを非森林域とした。300mグリッドの土地利用メッシュを図4-14に、森林域・非森林域の別を図4-15に示す。

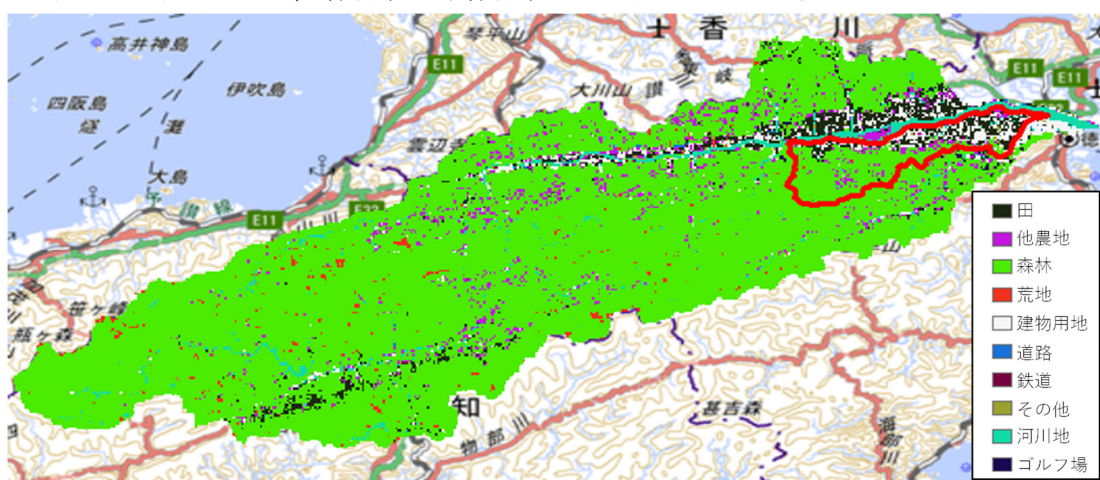


図 4-14 流出計算領域の300mメッシュ土地利用

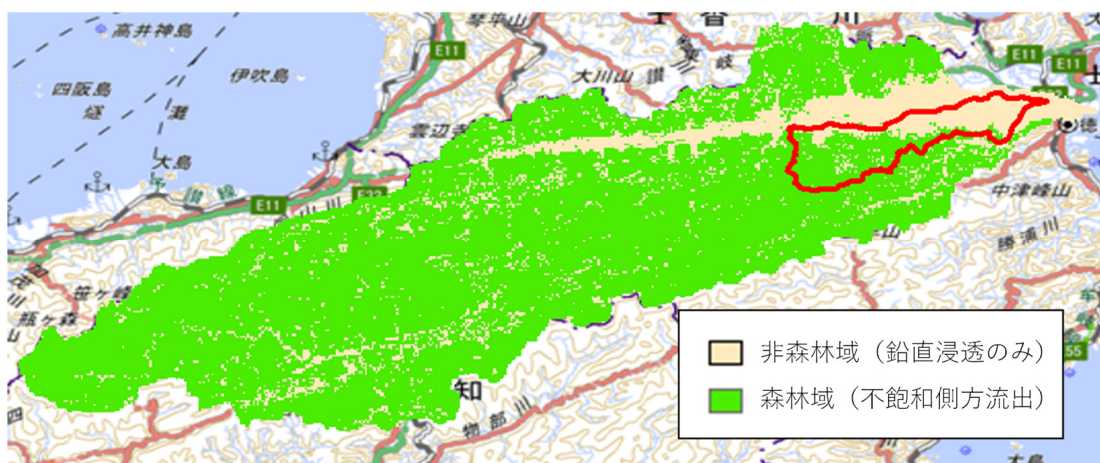


図 4-15 流出計算領域の300mメッシュ森林域・非森林域

吉野川水系において存在する 5 ダムについては、洪水期の洪水調節容量および計画放流量を用いた単純一定量方式として再現した。詳細を表 4-3 に示す。

表 4-3 吉野川水系のダム諸元

ダム名	本来の操作方式	流出計算での操作方式	洪水調節容量[m3]	計画放流量[m3/s]
池田ダム	ピークカット	単純一定量	4400000	11000
早明浦ダム	一定率一定量		9000000	2000
豊郷ダム	一定率一定量		12500000	900
柳瀬ダム	自由越流		7600000	1400
新宮ダム	単純一定量		5000000	1200

RRI モデルのキャリブレーションにおいては、河道粗度係数 $n_r[m^{-1/3}s]$ 、斜面粗度係数 $n_s[m^{-1/3}s]$ 、土壌厚 $d_a[m]$ 、(側方流を考慮する領域における)浸透係数 $k_a[m/s]$ 、鉛直浸透係数 $k_v[m/s]$ が操作変数となる。観測データとして、観測史上最大流量を記録した 2004 年 10 月の台風 23 号による洪水での岩津地点・池田地点の観測流量、流域全体をカバーするアメダス観測点の 1 時間降雨量データを用いた。

岩津地点および池田地点のそれぞれについて、観測流量ハイドログラフと RRI の出力ハイドログラフの間の Nash-Sutcliffe Efficiency (Nash 係数) と、観測値・出力値のうち大きい値を基準としたピーク比流量を算出し、それらの総和が最大となるようなパラメタの組み合わせを複数パターンと比較から決定した。結果のパラメタ群を表 4-4 に、そのパラメタ群を用いた際の流量ハイドログラフを図 4-16・図 4-17 に示す。池田地点での Nash 係数とピーク比流量はそれぞれ 0.897 と 0.885、岩津地点での Nash 係数とピーク比流量はそれぞれ 0.909 と 0.969 であり、合計値は 3.66 であった。

表 4-4 流出計算の RRI モデルで設定したパラメタ

	森林域	非森林域
河道粗度係数 $n_r[m^{-1/3}s]$	0.055	
斜面粗度係数 $n_s[m^{-1/3}s]$	0.3	0.3
土壌厚 $d_a[m]$	0.4	0.4
浸透係数 $k_a[m/s]$	0.125	
鉛直浸透係数 $k_v[m/s]$		$5.56 \times 10^{-7}$

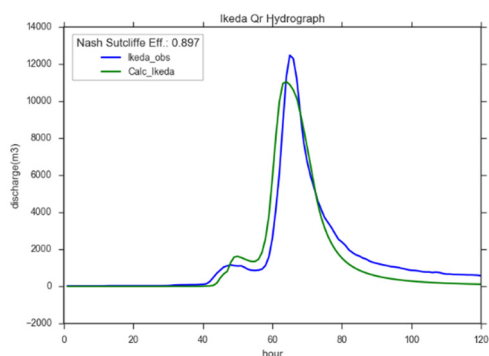


図 4-16 2004 年 10 月台風 23 号出水の  
池田地点ハイドログラフ

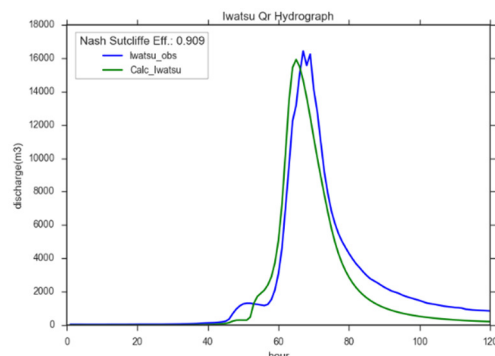


図 4-17 2004 年 10 月台風 23 号出水の  
岩津地点ハイドログラフ

続いて、キャリブレーション結果の検証のため、2014 年 8 月の台風 11 号による出水を用いた流出計算を、表 4-4 のパラメタ群を用いて行った。池田地点・岩津地点それぞれでの観測流量とモデル出力流量の比較ハイドログラフを図 4-18・図 4-19 に示す。池田地点での Nash 係数とピーク比流量はそれぞれ 0.816 と 0.984、岩津地点での Nash 係数とピーク比流量はそれぞれ 0.871 と 0.928 であり、合計値は 3.60 であった。

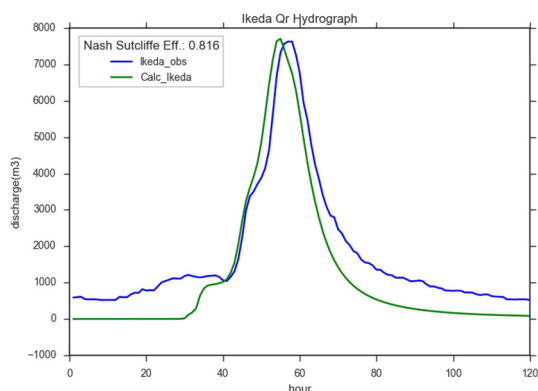


図 4-18 2014 年 8 月台風 11 号出水の池  
田地点ハイドログラフ

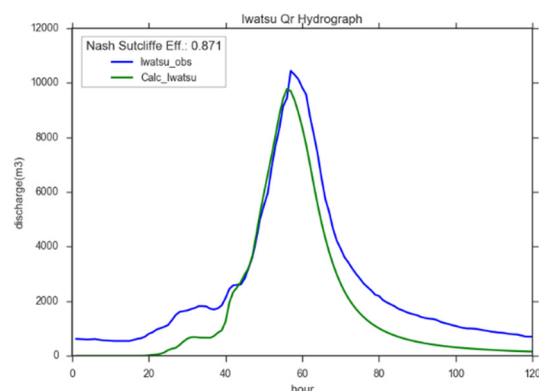


図 4-19 2014 年 8 月台風 11 号出水の岩  
津地点ハイドログラフ

一般に、Nash 係数が 0.7 以上の場合について、モデルの再現性が高いと判断される[77]が、2つの異なる出水に関する 2 地点での流量ハイドログラフについて、それぞれ 0.8 以上の値となっているため、流出計算のための RRI モデルは十分な再現性を持つと判断できる。



#### 4-2-6. 氾濫計算のキャリブレーション

流出計算の後、流出計算から求められた本川水位を支川・本川合流部の境界条件として氾濫計算を行う。本項では、氾濫計算に用いる RRI モデルのキャリブレーションについて述べる。

氾濫計算では、山崎ら[71]による衛星画像の水域データを用いて流向を補正した 30m グリッド DEM および流向ファイルを利用し、30m 解像度で行う。DEM を図 4-20 に示す。

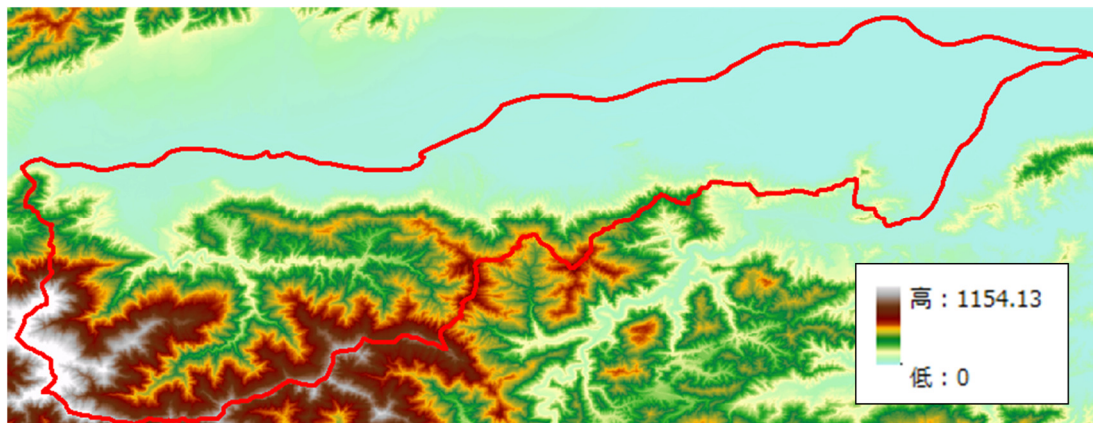


図 4-20 氾濫計算領域の 30m メッシュ DEM



図 4-21 氾濫計算領域の河道網

集水域面積が 1 km<sup>2</sup>以上のセルについて河道を割り当てた。河道網図を図 4-21 に示す。各可動セルにおける河道断面は、レジーム則に基づき式(4-6)と式(4-7)を用いて決定した。なお、A[km]は該当河道セルの集水面積、 $c_*$ と $s_*$ はパラメタである。

$$width[m] = c_w A^{s_w} \quad \dots\dots \text{式(4-6)}$$

$$depth[m] = c_d A^{s_d} \quad \dots\dots \text{式(4-7)}$$

※再掲

氾濫計算領域内の支川の断面形状から、浸水計算においては、 $c_w = 7.0$ ,  $s_w = 0.65$ ,  $c_d = 1.0$ ,  $s_d = 0.3$ の値を用いる。また、河道堤防については、川田川は実際の堤防高を用いたが、それ以外の支川は無堤掘り込み河道であるため設定していない。

降雨後の水の浸透・流出過程については、流出計算と同様に、森林域については浸透後に側方不飽和浸透流が生じるモデルを、非森林域については鉛直浸透流のみのモデルを採用した。ただし、国土数値情報土地利用分類細分メッシュデータ（2014）は100mグリッドであるため、30mグリッドにまで最大面積法でダウンスケールした後、土地利用が「森林」であるセルを森林域、それ以外のセルを非森林域とした。30mグリッドの土地利用メッシュを図4-22に、森林域・非森林域の別を図4-23に示す。

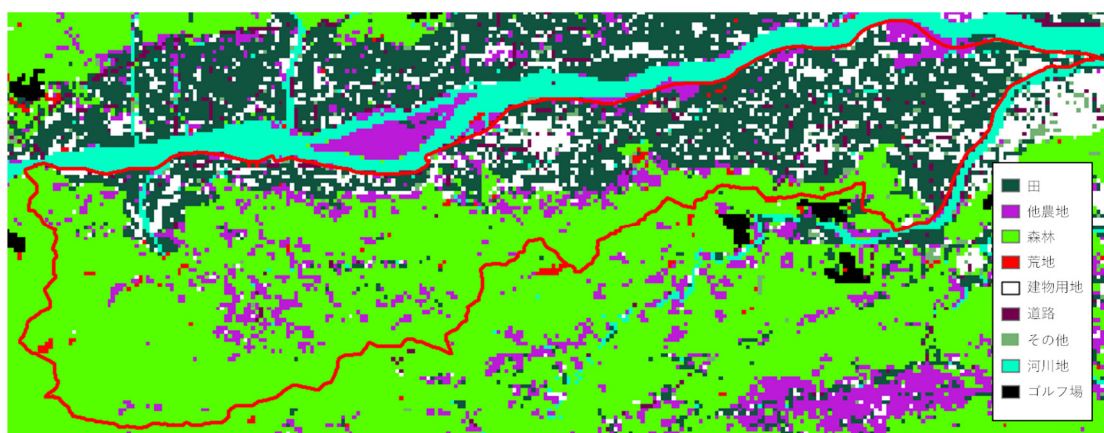


図 4-22 浸水計算領域の 30m メッシュ土地利用

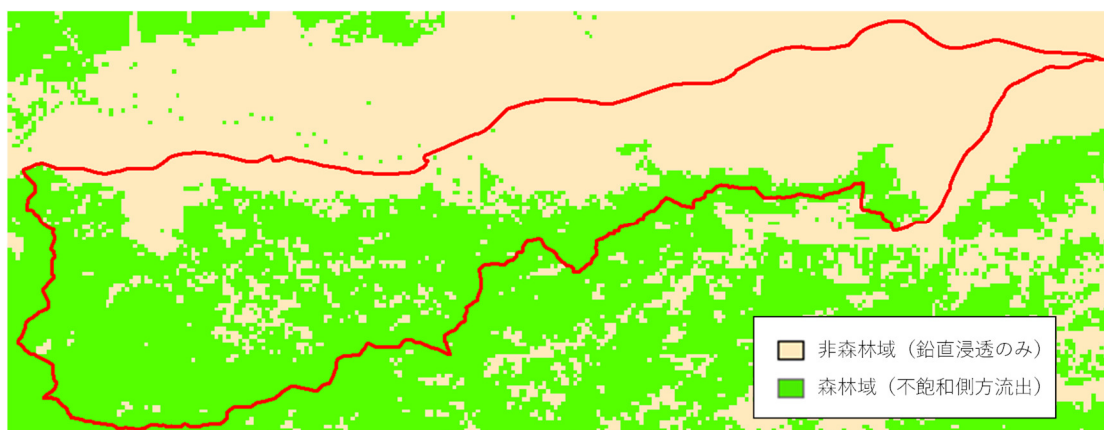


図 4-23 浸水計算領域の 30m メッシュ森林域・非森林域

計算領域内の支川では流量の観測が行われていないため、流量ハイドログラフの一致度を用いたキャリブレーションはできない。そこで本項では、浸水範囲のデータが入手できた2004年10月台風23号について、実際の浸水範囲と計算結果の浸水範囲との間でContingency Table Analysis（分割表分析）を用いた精度検証を行う。

Contingency Table Analysis では、「実際に浸水したか浸水しなかったか」と「モデルの出力では浸水しているか浸水していないか」の 2 軸を用いて、対象領域の各セルを表 4-5 に示す a~d の 4 つの類型に分類する[78, 79].

表 4-5 Contingency Table Analysis の基本表

		現実の観測結果	
		浸水した	浸水しなかった
モデル出力	浸水した	a	b
	浸水しなかった	c	d

各類型のセル数もしくは面積を用いて、以下のモデル正確性 (Model Accuracy,  $M_{AC}$ ), モデル過大評価 (Model Overestimation Error,  $M_{OE}$ ), モデル過小評価 (Model Underestimation Error,  $M_{UE}$ ) がそれぞれ定義できる. ただし, 類型 d に属する要素の割合が多い場合には, それぞれ後者の定義式を用いることが推奨されている.

$$M_{AC} = \frac{a + d}{a + b + c + d} \text{ or } M_{AC} = \frac{a}{a + b + c} \quad \dots \text{式(4-8)}$$

$$M_{OE} = \frac{b}{a + b + c + d} \text{ or } M_{OE} = \frac{b}{a + b + c} \quad \dots \text{式(4-9)}$$

$$M_{UE} = \frac{c}{a + b + c + d} \text{ or } M_{UE} = \frac{c}{a + b + c} \quad \dots \text{式(4-10)}$$

また, 検証のために用いる 2004 年 10 月台風 23 号の浸水領域を図 4-24 に示す. このデータは徳島県により作成された「平成 16 年台風 23 号浸水痕跡マップ」に基づく [80].

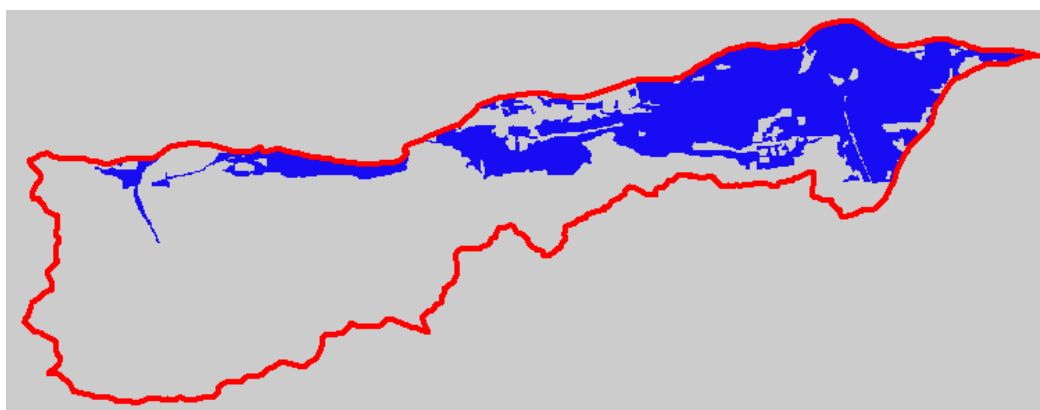


図 4-24 2004 年 10 月台風 23 号による計算対象フレーム内部の浸水範囲

流出計算に関するキャリブレーションと同様に、河道粗度係数 $n_r[m^{-1/3}s]$ 、斜面粗度係数 $n_s[m^{-1/3}s]$ 、土壌厚 $d_a[m]$ 、(側方流を考慮する領域における)浸透係数 $k_a[m/s]$ 、鉛直浸透係数 $k_v[m/s]$ の5つを操作変数とし、 $M_{AC}$ を最大化し、かつ $M_{OE}$ と $M_{UE}$ ができるだけ等しくなるようなパラメタ群を複数パターンの比較から選択したところ、流出計算のキャリブレーション結果と同様のパラメタ群が選択された。選択されたパラメタ群を表 4-6 に示す。また、Contingency Table を表 4-7 に示す。

表 4-6 氾濫計算の RRI モデルで設定したパラメタ

	森林域	非森林域
河道粗度係数 $n_r[m^{-1/3}s]$	0.055	
斜面粗度係数 $n_s[m^{-1/3}s]$	0.3	0.3
土壌厚 $d_a[m]$	0.4	0.4
浸透係数 $k_a[m/s]$	0.125	
鉛直浸透係数 $k_v[m/s]$		$5.56 \times 10^{-7}$

表 4-7 選択されたパラメタ群での Contingency Table

		現実の観測結果	
		浸水した	浸水しなかった
モデル出力	浸水した	44.6km <sup>2</sup>	13.5km <sup>2</sup>
	浸水しなかった	15.4km <sup>2</sup>	136.7km <sup>2</sup>

このとき、モデル正確性 $M_{AC} = 0.61$  or  $0.86$ 、モデル過大評価 $M_{OE} = 0.18$  or  $0.06$ 、モデル過小評価 $M_{UE} = 0.21$  or  $0.07$ であった。流出計算のキャリブレーションで用いた Nash 係数等とは異なり、Contingency Table Analysis におけるモデル正確性 $M_{AC}$ について、十分な精度と見なせる一般的な基準は確立されていないものの、既往研究[78]においては本研究と同程度のモデル正確性 $M_{AC}$ で十分に高い精度と結論している。本項でのキャリブレーションに関しても、モデル正確性 $M_{AC}$ をこれ以上向上させることが難しいことから、表 4-6 のパラメタ群での結果を採用するものとする。

このときの類型 a~d の分布をに示す。なお、RRI モデルにおいては、通常の流出も地表流水として再現されるため、非浸水性の領域においても浸水深が算出されてしまう。一方で、検証のために用いた浸水領域データは浸水痕跡に基づくものであり、ある程度以上の浸水

深の領域のみが記録されている恐れがある。本研究では、浸水計算結果の最大浸水深が0.3m以上のセルについてのみ浸水したと考え、最大浸水深が0.3m未満のセルについては非浸水と判定した。



図 4-25 2004年10月台風23号の浸水計算キャリブレーション結果

#### 4-2-7. 降雨抽出・流出計算・氾濫計算の実施および年最大浸水深の算出

4-2-4 の手順に従い、d4PDF のアメダス観測点に対するバイアス補正された降雨アンサンブルデータ 1500 年分から、合計 2574 降雨事象が計算対象降雨として抽出された。これらすべての降雨事象について、4-2-5 においてキャリブレーションを行った流出計算用の RRI モデルを用いて吉野川流域全体での流出計算を行った。その後、各降雨事象に関する支川・本川合流部の水位時系列データを境界条件として、4-2-6 においてキャリブレーションを行った浸水計算用の RRI モデルを用いて、計算対象フレーム内部での浸水計算を行った。

1 つの降雨事象のみが抽出された仮想年については、その降雨事象による各セルの浸水深をその仮想年に関する各セルの年最大浸水深とした。また、2 つ以上の降雨事象が抽出された仮想年については、各セルについてすべての降雨事象を通じた最大の浸水深を算出し、各セルの年最大浸水深とした。この計算により、1500 年の仮想年すべてについて、年最大浸水深がセルごとに算出された。



### 4-3. 土地利用および浸水深に基づく被害額推定

前節での計算により、1500 仮想年に関するセル毎の年最大浸水深が求められた。本節ではそれらの結果を元に、各仮想年に関するセル毎の年最大被害額の算出について述べる。

国土数値情報土地利用細分メッシュデータにおける土地利用分類のうち、一般資産被害が生じるのは土地利用が「田んぼ」「その他農地」「建物用地」の場合である。本節ではこれらの土地利用のそれぞれについて、治水経済評価マニュアル（案）<sup>2</sup>・各種統計および既往研究[81, 82]を参考に、浸水被害を算出する。

#### 4-3-1. 田んぼの浸水被害額

田んぼ 1セルあたりの浸水被害額は下式により算出される。

$$D_{\text{田}} = V_{\text{田}} \times R_{\text{田}}(h_{\text{inun}}) \quad \dots \text{式(4-11)}$$

ここで、 $D_{\text{田}}$ ：セル被害額、 $V_{\text{田}}$ ：田んぼ 1セルあたり評価額、 $h_{\text{inun}}$ ：セル浸水深、 $R_{\text{田}}$ ：田んぼのセル浸水深別被害率関数、である。

田んぼ 1セルあたり評価額 $V_{\text{田}}$ は以下のように算出される。

$$V_{\text{田}} = \frac{12400000000[\text{yen}]}{264.162[\text{km}^2]} \times 0.0009[\text{km}^2/\text{cell}] = 42246[\text{yen}/\text{cell}]$$

「田んぼ」セル面積は徳島県全体で 264.162 km<sup>2</sup>である<sup>3</sup>。徳島県全体での米の年産出額実額は、2011 年（平成 23 年）から 2015 年（平成 27 年）までの 5 年間平均で 124 億円である[83]<sup>4</sup>。浸水計算は 30m グリッドで行っているので、1セルの面積は 900m<sup>2</sup>、すなわち 0.0009 km<sup>2</sup>である。従って、30m グリッドの田んぼセル 1セルあたりの評価額は上式のように算出される。

また、田んぼのセル浸水深別被害率関数 $R_{\text{田}}$ は、表 4-8 に示すように設定する<sup>5</sup>。

表 4-8 田んぼおよびその他農地に関する浸水深別被害表

	$h_{\text{inun}} < 0.5[\text{m}]$	$0.5[\text{m}] \leq h_{\text{inun}} < 1.0[\text{m}]$	$1.0[\text{m}] \leq h_{\text{inun}}$
田んぼ	0.3	0.44	0.54
その他農地	0.42	0.48	0.67

<sup>2</sup> 付属の各種資産評価単価及びデフレータ表は平成 28 年 3 月改訂版を用いる。

<sup>3</sup> 国土数値情報土地利用細分メッシュデータ 2014 年（平成 26 年）

<sup>4</sup> 農林水産省平成 28-29 年徳島農林水産統計年報 第 9 部 農業産出額及び生産農業所得

<sup>5</sup> 治水経済評価マニュアル（案）

#### 4-3-2. その他農地の浸水被害額

その他農地1セルあたりの浸水被害額は下式により算出される。

$$D_{畑} = V_{畑} \times R_{畑}(h_{inun}) \quad \dots \text{式(4-12)}$$

ここで、 $D_{畑}$ ：セル被害額、 $V_{畑}$ ：その他農地1セルあたり評価額、 $h_{inun}$ ：セル浸水深、 $R_{畑}$ ：その他農地のセル浸水深別被害率関数、である。

その他農地1セルあたり評価額 $V_{畑}$ は以下のように算出される。

$$V_{畑} = \frac{88200000000[\text{yen}]}{197.600[\text{km}^2]} \times 0.0009[\text{km}^2/\text{cell}] = 401720[\text{yen}/\text{cell}]$$

「その他農地」セル面積は徳島県全体で197.600 km<sup>2</sup>である<sup>6</sup>。また、徳島県全体での米以外の農産品の年産出額実績は、2011年（平成23年）から2015年（平成27年）までの5年間平均で882億円である<sup>7</sup>。浸水計算は30mグリッドで行っているため、1セルの面積は900m<sup>2</sup>、すなわち0.0009 km<sup>2</sup>である。従って、30mグリッドのその他農地セル1セルあたりの評価額は上記のように算出される。

また、その他農地のセル浸水深別被害率関数 $R_{畑}$ は、表4-8に示すように設定する<sup>8</sup>。

#### 4-3-3. 建物用地の浸水被害額

建物用地1セルあたりの浸水被害額は下式により算出される。

$$D_{建物用地} = D_{家屋} + D_{家庭用品} + D_{償却} + D_{在庫} \quad \dots \text{式(4-13)}$$

ここで、 $D_{家屋}$ ：家屋被害額、 $D_{家財}$ ：家庭用品被害額、 $D_{償却}$ ：事業所償却資産被害額、 $D_{在庫}$ ：事業所在庫資産被害額である。建物用地セルには一般家屋と事業所が混在しているため、その双方の被害を考慮する必要がある。

家屋被害額 $D_{家屋}$ は下式により算出される。

$$D_{家屋} = V_{家屋} \times R_{家屋}(h_{inun}) \quad \dots \text{式(4-14)}$$

ここで、 $V_{家屋}$ ：1セルあたり家屋評価額、 $R_{家屋}$ ：浸水深別家屋被害率である。

1セルあたりの家屋評価額 $V_{家屋}$ は下式により算出される。

$$V_{家屋} = 181700 \left[ \frac{\text{yen}}{\text{床m}^2} \right] \times \frac{62246235[\text{床m}^2]}{212.392[\text{km}^2]} \times 0.0009 \left[ \frac{\text{km}^2}{\text{cell}} \right] = 47926207 \left[ \frac{\text{yen}}{\text{cell}} \right]$$

徳島県の家屋床面積あたり評価額が181700円/床m<sup>2</sup>である<sup>9</sup>。また、徳島県全体での総家屋床面積が62246235床m<sup>2</sup>である[84]<sup>10</sup>。一方で、「建物用地」面積は徳島県全体で212.392km<sup>2</sup>である<sup>11</sup>。浸水計算は30mグリッドで行っているため、1セルの面積は900m<sup>2</sup>、すなわち0.0009km<sup>2</sup>である。上式はこれらの値を用いている。

<sup>6</sup> 国土数値情報土地利用細分メッシュデータ 2014年（平成26年）

<sup>7</sup> 農林水産省平成28-29年 徳島農林水産統計年報 第9部 農業産出額及び生産農業所得

<sup>8</sup> 治水経済評価マニュアル（案）

<sup>9</sup> 治水経済評価マニュアル（案）

<sup>10</sup> 平成27年度 固定資産の価格等の概要調書（都道府県別表）Ⅱ家屋 表1

<sup>11</sup> 国土数値情報土地利用細分メッシュデータ 2014年（平成26年）

家屋の浸水深別被害率 $R_{\text{家屋}}$ は、治水経済評価マニュアル（案）に基づく表 4-9 の該当行の通りである。

表 4-9 建物用地に関する浸水深別被害率

	床下浸水[m]	床上浸水 [m]				
	$h_{inun} < 0.45$	$0.45 \leq h_{inun} < 0.5$	$0.5 \leq h_{inun} < 1.0$	$1.0 \leq h_{inun} < 2.0$	$2.0 \leq h_{inun} < 3.0$	$3.0 \leq h_{inun}$
建物被害	0.032	0.092	0.119	0.266	0.58	0.834
家庭用品被害	0.021	0.145	0.326	0.508	0.928	0.991
事業所償却資産被害	0.099	0.232	0.453	0.789	0.966	0.995
事業所在庫資産被害	0.056	0.128	0.267	0.586	0.897	0.982

家庭用品被害額 $D_{\text{家庭用品}}$ は下式により算出される。

$$D_{\text{家庭用品}} = V_{\text{家庭用品}} \times R_{\text{家庭用品}}(h_{inun}) \quad \dots \text{式(4-15)}$$

ここで、 $V_{\text{家庭用品}}$ ：1セルあたり家庭用品評価額、 $R_{\text{家庭用品}}$ ：浸水深別家庭用品被害率である。1セルあたりの家庭用品被害額 $V_{\text{家庭用品}}$ は下式により算出される。

$$V_{\text{家庭用品}} = 13230000 \left[ \frac{\text{yen}}{\text{世帯}} \right] \times \frac{305754[\text{世帯}]}{212.392[\text{km}^2]} \times 0.0009 \left[ \frac{\text{km}^2}{\text{cell}} \right] = 17141034 \left[ \frac{\text{yen}}{\text{cell}} \right]$$

1世帯あたりの家庭用品評価額が13230000円/世帯である<sup>12</sup>。また、徳島県の総世帯数が305754世帯である<sup>13</sup>。一方で、「建物用地」セル面積は徳島県全体で212.392km<sup>2</sup>である<sup>14</sup>。浸水計算は30mグリッドで行っているため、1セルの面積は900m<sup>2</sup>、すなわち0.0009km<sup>2</sup>である。上式はこれらの値を用いている。

家庭用品の浸水深別被害率 $R_{\text{家庭用品}}$ は、表 4-9 の該当行の通りである。

事業所償却資産被害額 $D_{\text{償却}}$ は下式により算出される。

$$D_{\text{償却}} = V_{\text{償却}} \times R_{\text{償却}}(h_{inun}) \quad \dots \text{式(4-16)}$$

ここで、 $V_{\text{償却}}$ ：1セルあたり事業所償却資産評価額、 $R_{\text{償却}}$ ：浸水深別事業所償却資産被害率である。1セルあたりの事業所償却資産評価額 $V_{\text{償却}}$ は下式により算出される。

$$V_{\text{償却}} = 3389790 \left[ \frac{\text{yen}}{\text{従業者}} \right] \times \frac{342272[\text{従業者}]}{212.392[\text{km}^2]} \times 0.0009 \left[ \frac{\text{km}^2}{\text{cell}} \right] = 4916422 \left[ \frac{\text{yen}}{\text{cell}} \right]$$

全業種に関する従業者1人あたりの事業所償却資産評価額が3389790円/従業者である。この値は産業分類別従業者1人あたり事業所償却資産評価額<sup>15</sup>を徳島県の産業分類別従業者

<sup>12</sup> 治水経済評価マニュアル（案）

<sup>13</sup> 2015年国勢調査

<sup>14</sup> 国土数値情報土地利用細分メッシュデータ 2014年（平成26年）

<sup>15</sup> 治水経済評価マニュアル（案）



者数<sup>16</sup>で加重平均した値を、徳島県の全産業を通じた総従業者数<sup>17</sup>である 342272 人で除したものである。一方で、「建物用地」セル面積は徳島県全体で 212.392km<sup>2</sup>である<sup>18</sup>。浸水計算は 30m グリッドで行っているため、1セルの面積は 900m<sup>2</sup>、すなわち 0.0009km<sup>2</sup>である。上式はこれらの値を用いている。

事業所償却資産の浸水深別被害率 $R_{\text{償却}}$ は、表 4-9 の該当行の通りである。

事業所在庫資産被害額 $D_{\text{在庫}}$ は下式により算出される。

$$D_{\text{在庫}} = V_{\text{在庫}} \times R_{\text{在庫}}(h_{\text{inun}}) \quad \dots \text{式(4-17)}$$

ここで、 $V_{\text{在庫}}$ ：1セルあたり事業所在庫資産評価額、 $R_{\text{在庫}}$ ：浸水深別事業所在庫資産被害率である。1セルあたりの事業所在庫資産評価額 $V_{\text{在庫}}$ は下式により算出される。

$$V_{\text{償却}} = 1629725 \left[ \frac{\text{yen}}{\text{従業者}} \right] \times \frac{342272 [\text{従業者}]}{212.392 [\text{km}^2]} \times 0.0009 \left[ \frac{\text{km}^2}{\text{cell}} \right] = 2363692 \left[ \frac{\text{yen}}{\text{cell}} \right]$$

全業種に関する従業者1人あたりの事業所在庫資産評価額が 1629725 円／従業者である。この値は産業分類別従業者 1 人あたり事業所在庫資産評価額<sup>19</sup>を徳島県の産業分類別従業者数<sup>20</sup>で加重平均した値を、徳島県の全産業を通じた総従業者数<sup>21</sup>である 342272 人で除したものである。一方で、「建物用地」セル面積は徳島県全体で 212.392km<sup>2</sup>である<sup>22</sup>。浸水計算は 30m グリッドで行っているため、1セルの面積は 900m<sup>2</sup>、すなわち 0.0009km<sup>2</sup>である。上式はこれらの値を用いている。

事業所在庫資産の浸水深別被害率 $R_{\text{償却}}$ は、表 4-9 の該当行の通りである。

---

<sup>16</sup> 経済産業省経済センサス基礎調査平成 26 年版 事業所に関する集計 徳島県 表 3-2

<sup>17</sup> 経済産業省経済センサス基礎調査平成 26 年版 事業所に関する集計 徳島県 概要

<sup>18</sup> 国土数値情報土地利用細分メッシュデータ 2014 年（平成 26 年）

<sup>19</sup> 治水経済評価マニュアル（案）

<sup>20</sup> 経済産業省経済センサス基礎調査平成 26 年版 事業所に関する集計 徳島県 表 3-2

<sup>21</sup> 経済産業省経済センサス基礎調査平成 26 年版 事業所に関する集計 徳島県 概要

<sup>22</sup> 国土数値情報土地利用細分メッシュデータ 2014 年（平成 26 年）

#### 4-3-4. 各年代の土地利用について

反復氾濫解析により求めた1500仮想年分の各セルの年最大浸水深に、各セルのある時点での土地利用を重ねることにより、本説で検討した浸水被害額の算出式を用いることができる。本研究では、1977年（昭和52年）・1986年（昭和61年）・1991年（平成3年）・1998年（平成9年）・2006年（平成18年）・2014年（平成26年）の6年代について、国土数値情報土地利用細分メッシュデータから30mグリッドの土地利用マップを作成した。各年の土地利用を図4-26から示す。森林域の土地利用はほとんど変化がない一方で、1977年に田んぼ中心の土地利用であった領域が、1998年以降急速に建物用地に転換していることが読み取れる。

#### 4-3-5. 2004年10月台風23号による浸水被害額の検証

2004年10月の台風23号による浸水被害について、浸水計算結果の浸水深分布から計算対象フレーム内での被害額を算出したところ、51.1億円となった。一方で、国土交通省の水害統計に基づく2004年の吉野川市・石井町の一般資産被害額は34.2億円であった。本研究の計算対象フレームは吉野川市・石井町に加えて徳島市の一部を含むことを考慮すると、推定された被害額は概ね妥当であると考えられる。

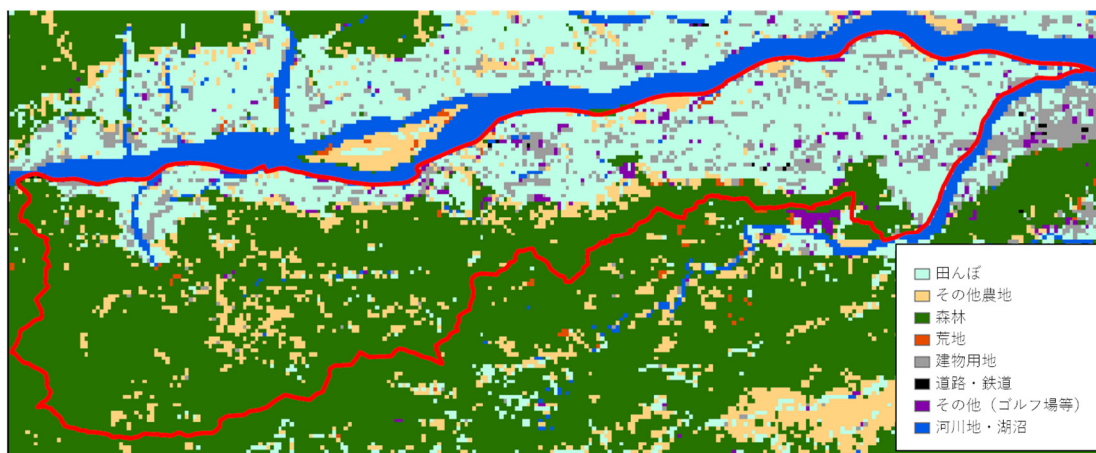


図 4-26 1977年（昭和52年）の土地利用

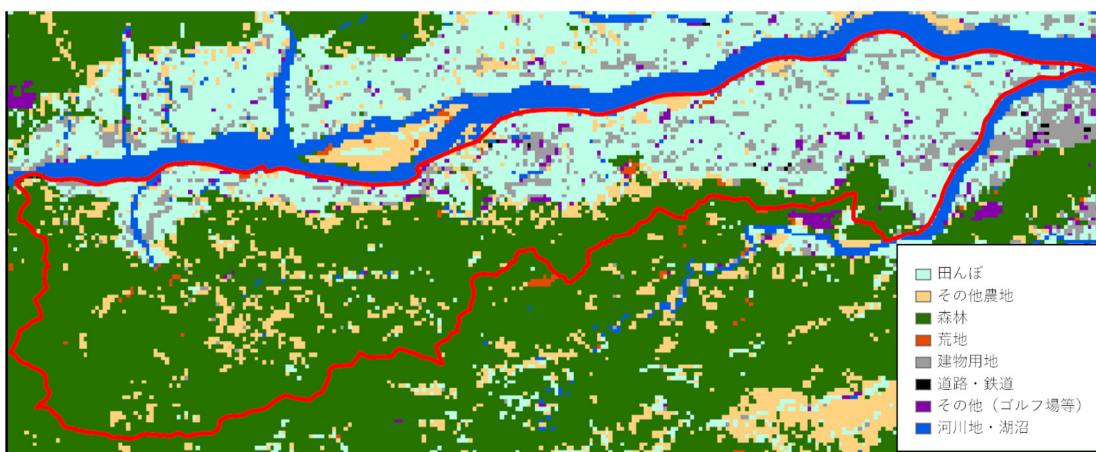


図 4-27 1986年（昭和61年）の土地利用

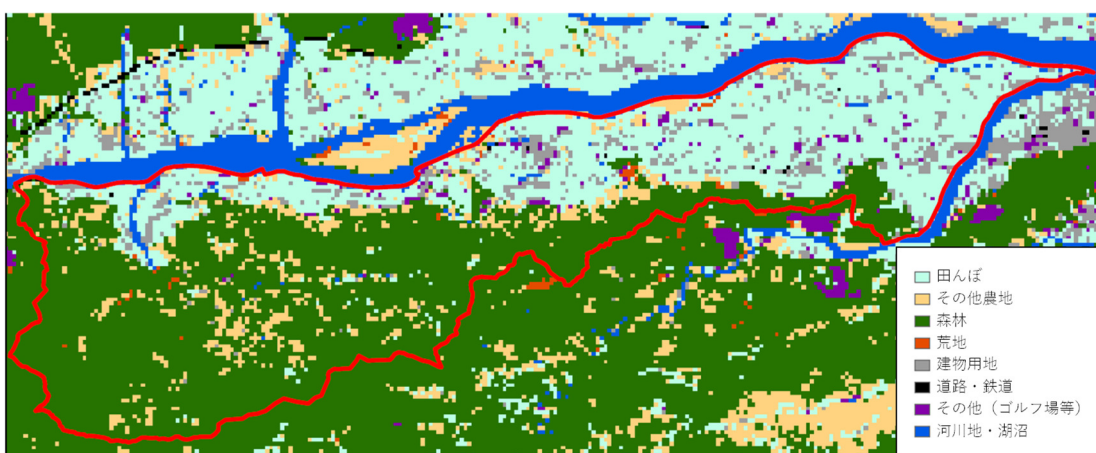


図 4-28 1991年（平成3年）の土地利用

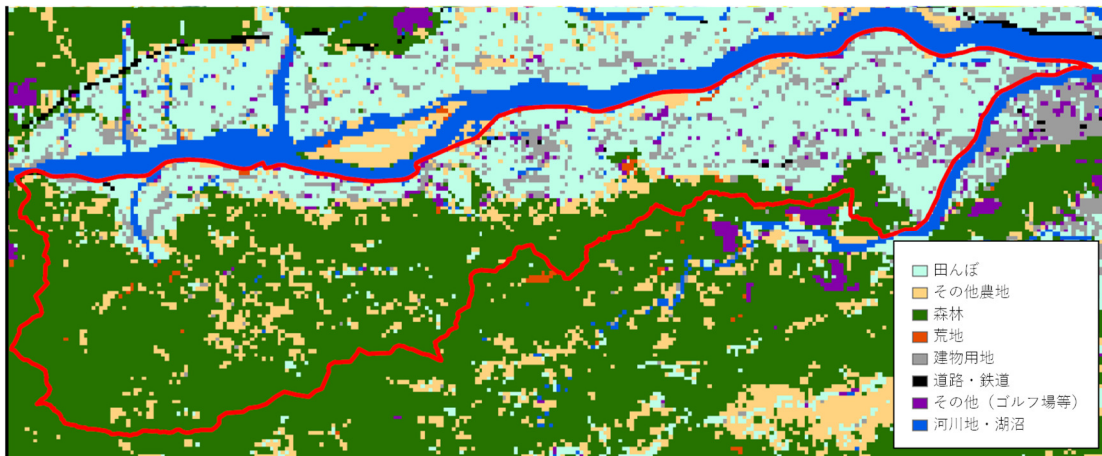


図 4-29 1998年（平成9年）の土地利用

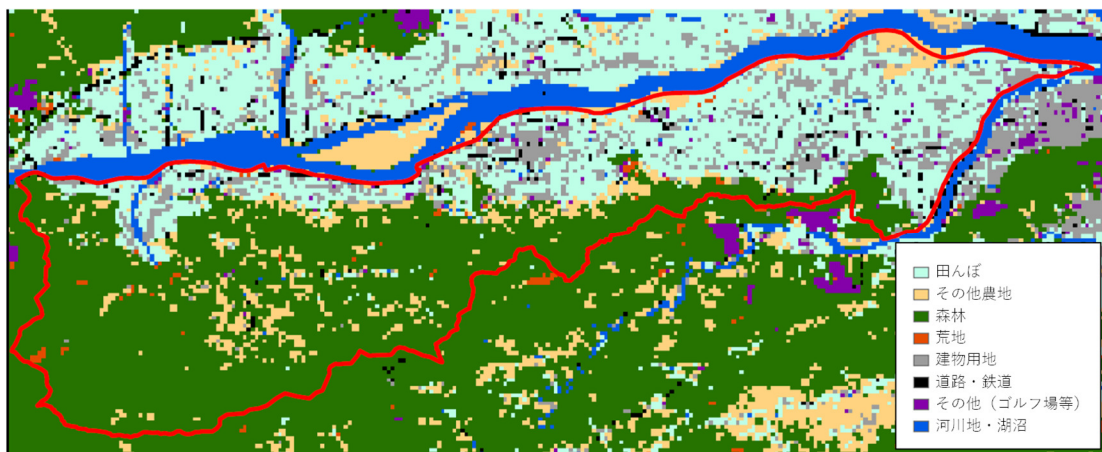


図 4-30 2006年（平成18年）の土地利用

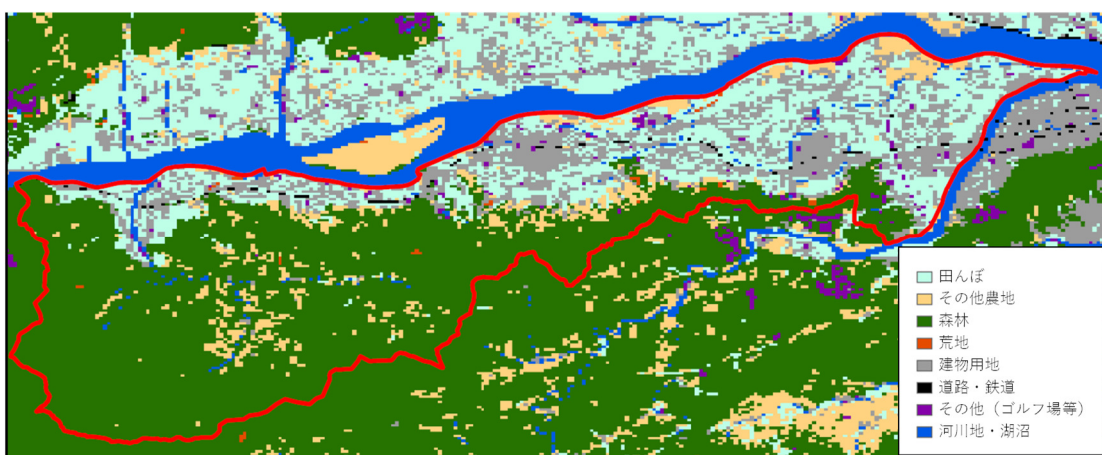


図 4-31 2014年（平成26年）の土地利用



#### 4-3-6. 浸水被害額推定の実施および水害リスクカーブ・水害ハザードカーブの作成

水害リスクと水害ハザードの関係性は、下式のように表され、また既往の研究においてはより視覚的に図のように表される場合もある[85].

$$\text{Risk} = \text{Hazard} \times \text{Exposure} \times \text{Vulnerability}$$



図 4-32 Risk, Hazard, Exposure, Vulnerability の関係概念図 ([85]を筆者編集)

Hazard は災害外力の強度 (Intensity) に相当し、河川水害においては浸水深で表される場合が多い。Exposure は財の暴露に相当し、家屋や農作物等の被害が生じうる物体が存在するかを示している。Vulnerability は財が災害外力に暴露した際の脆弱性に相当し、どの程度の Hazard Intensity に対しどの程度の被害率が出るかを示している。これらすべての要素が重なり合うとき、そこに実被害としての Risk が生じる。

図 4-32 や上式に示される通り、Risk が包括的な概念である一方、Hazard はその一要素である。Risk は各地先での土地利用変化や財の集積等による Exposure および Vulnerability の変化により短期的に変化するが、一方で Hazard は上流部の大規模な土地利用変化やダム建設等による流出傾向の変化によってのみ変化するため<sup>23</sup>、経時的により安定である。すなわち、水害ハザードカーブは各地先において経時的に安定な確率的災害外力特性を表している一方で、水害リスクカーブは各地先における各土地利用年代時点での確率的被害特性を表していると言える。本研究では、反復汎濫解析により求めることができる水害ハザードカーブと水害リスクカーブの双方を利用する。

<sup>23</sup> 築堤等の堤防整備事業によっても Hazard は変化するが、本研究においては破堤を考慮すべき再帰期間 100 年以上の出水については検討対象外としている。

4-2-7において求めた1500仮想年分の年最大浸水深マップから、各セルの年最大浸水深を順序化し年超過確率を求めることで、各セルの水害ハザードカーブを作成した。水害ハザードカーブは、縦軸に年超過確率、横軸に対応する年最大浸水深を示した曲線であり、ハザードの確率的特徴を表している。

続いて、4-2-7において求めた1500仮想年分の年最大浸水深マップと、6つの土地利用年代それぞれの土地利用マップを用いて、6つ土地利用年代それぞれについて1500仮想年分の年最大被害額マップを作成した。その後、それぞれの土地利用年代について、各セルの年最大被害額を順序化し年超過確率を求めることで、各セルの水害リスクカーブを作成した。水害リスクカーブは、縦軸に年超過確率、横軸に対応する年最大被害額を示した曲線であり、リスクの確率的特徴を表している。

本章におけるこれまでの計算フローを図4-33に示す。

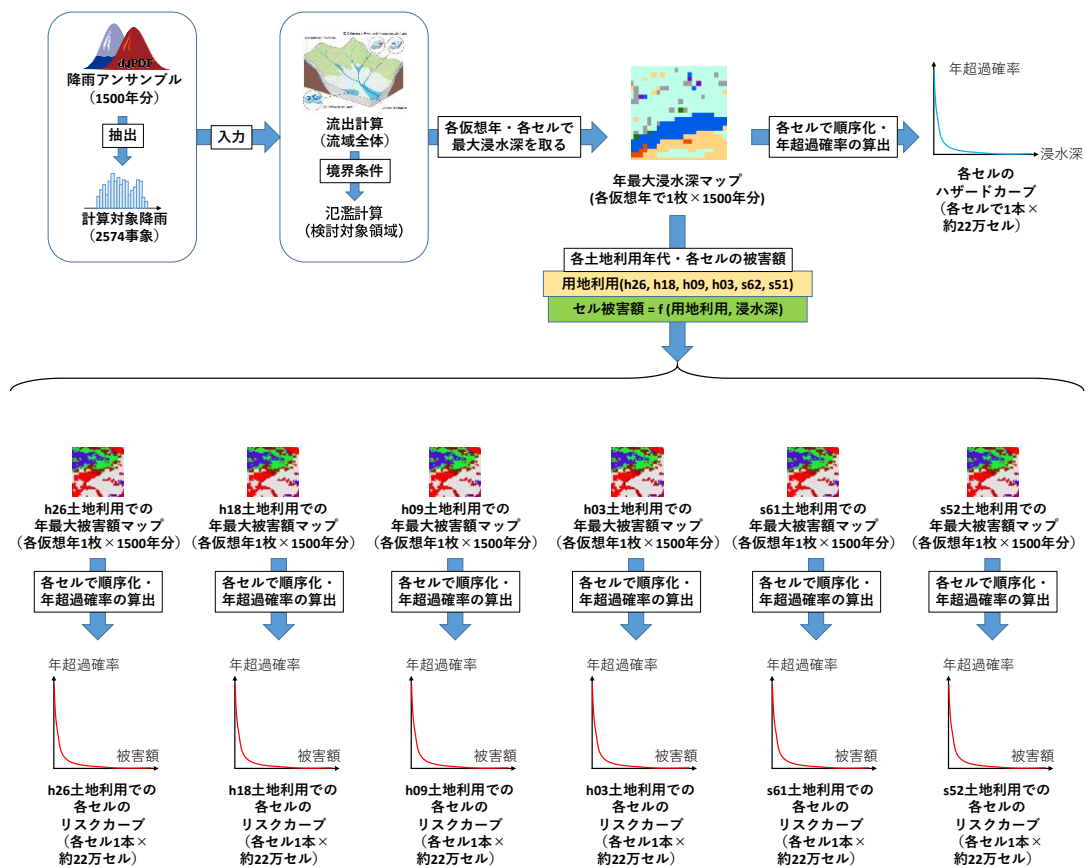


図 4-33 第4章前半の計算フローチャート

#### 4-4. 多数の水害リスクカーブおよび水害ハザードカーブの分析手法

前節までで算出された水害リスクカーブおよび水害ハザードカーブは、30m グリッドで算出されており、地先の確率的リスク特徴・確率的ハザード特徴を十分に表していると考えられる。一方で、水害ハザードカーブは計算対象フレーム内部の各セルについて1本算出されるため、合計約22万本と多大である。水害リスクカーブについても、6つの土地利用年それぞれについて、各セルに1本、計算対象フレーム内部では合計約22万本が算出される。従って、全土地利用年代を考慮した水害リスクカーブは合計約132万本が算出される。

第2章・第3章でも検討した通り、大多数の水害リスクカーブ・水害ハザードカーブについて目視でその類似性を評価することは現実的ではない。本節では、水害リスクカーブや水害ハザードカーブの類似性に基づき、対象領域内部を地理的に構造化する手法を2種類提案する。第一の手法はカーブ自体のクラスタリングであり、第二の手法は前章においても用いた再帰期間ごとのリスク寄与率による類型化である。それぞれの手法の長所・短所と、適用可能範囲についても検討する。

##### 4-4-1. 水害リスクカーブと水害ハザードカーブの違い

縦軸に年超過確率を取り、横軸に着目する変数を取る点は、水害リスクカーブと水害ハザードカーブで同様である。着目変数が年最大被害額であるとき曲線は水害リスクカーブとなり、一方で着目変数が年最大浸水深であるとき曲線は水害ハザードカーブとなる。これら2種類の曲線は、その形状から着目変数の確率的特性を読み取れるという共通の利点があるが、一方でその活用に関しては異なる点がある。

水害リスクカーブでは曲線の左下領域の面積が、その水害リスクカーブで表される確率的リスクの被害額期待値に等しい。したがって、任意の再帰期間の区間に属する水害の被害額期待値を求めたい場合、その再帰期間の区間と対応した年超過確率の区間をとり、その区間に対応した水害リスクカーブの左下領域の面積を算出すれば良い。例として、再帰期間を10年未満、10年~50年、50年~100年に区切ったとき、それぞれの再帰期間に対応する被害額期待値は、図4-34に示した各領域の面積となる。このようにして求めた被害額期待値から、我が国の実際の河川計画においても、治水事業の費用便益分析で用いる年平均被害軽減額期待値が算出されている。すなわち、水害リスクカーブは、その曲線形状に加えて、左下面積についても活用がなされている。

一方で水害ハザードカーブでは、曲線の左下領域の面積は実質的意味を持たず、実際の河川行政においても利用されない。すなわち、水害ハザードカーブは、その曲線形状のみが活用可能な情報である。

したがって、水害リスクカーブに基づく地先の確率的リスク特徴の分析には、水害リスクカーブの形状と、その左下面積の2つの情報を用いることができるのに対し、水害ハザードカーブに基づく地先の確率的ハザード特徴の分析には、水害ハザードカーブの形状のみを用いることとなる。

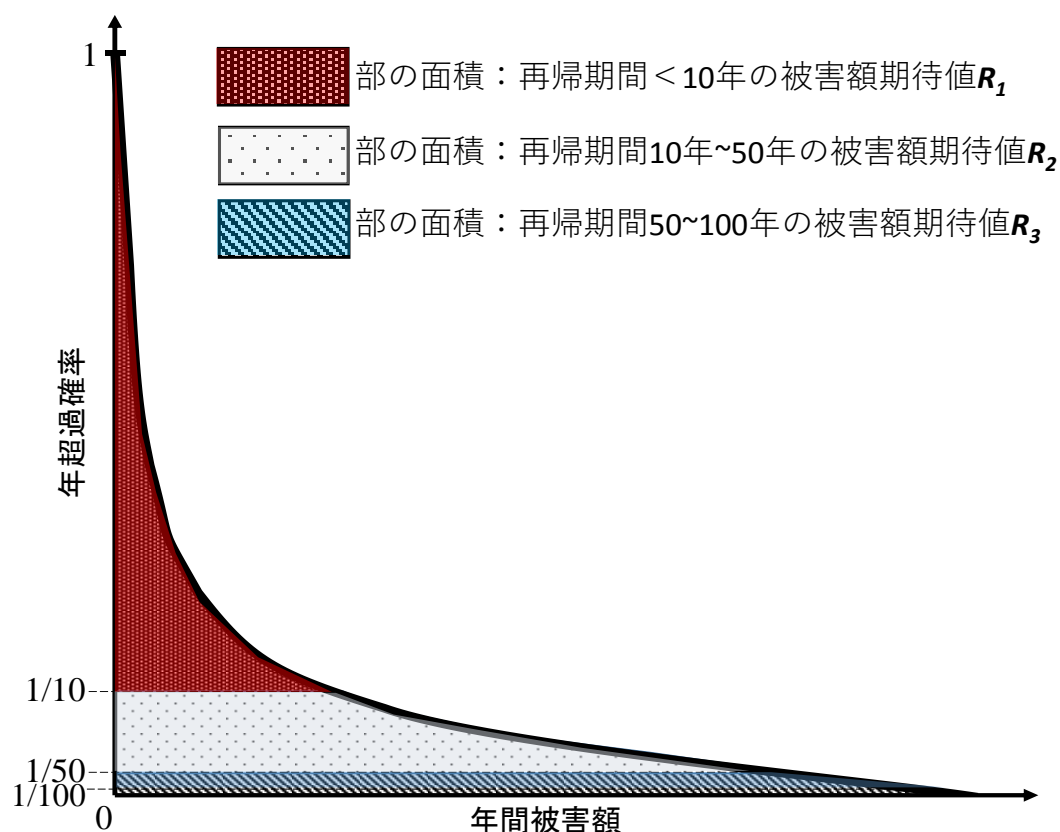


図 4-34 水害リスクカーブと再帰期間ごとの被害額期待値の関係

第2章・第3章で用いている「再帰期間ごとのリスク寄与率」指標とそれに基づいた類型化は、水害リスクカーブの左下面積を用いている。したがって、同様の考え方に基づいた指標の定義や類型化は水害ハザードカーブには適用できず、水害ハザードカーブの形状類似性に基づいて対象領域内部を地理的に構造化する手法を考案する必要がある。

#### 4-4-2. 曲線の形状類似性に基づいた構造化手法：曲線自体のクラスタリング

本章では、前項の課題への対応策として、水害リスクカーブ・水害ハザードカーブの曲線をベクトルとして離散化し、それ自体にクラスタリングを行うことで形状類似性を分析する手法を提案する。

水害リスクカーブおよび水害ハザードカーブは、年超過確率を縦軸とし、その値域は $[0,1]$ で共通である。そこで、縦軸を  $N$  等分し、それぞれの年超過確率の値に対応する浸水深もしくは被害額を要素とする  $N$  次元ベクトルに曲線を離散化することが可能である。2本の年超過確率曲線に関する  $N=5$  の際の離散化例を図 4-35 に示す。青色の年超過確率曲線はベクトル  $\vec{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]$  として、赤色の年超過確率曲線はベクトル  $\vec{y} = [y_1, y_2, y_3, y_4, y_5]$  として離散化されている。



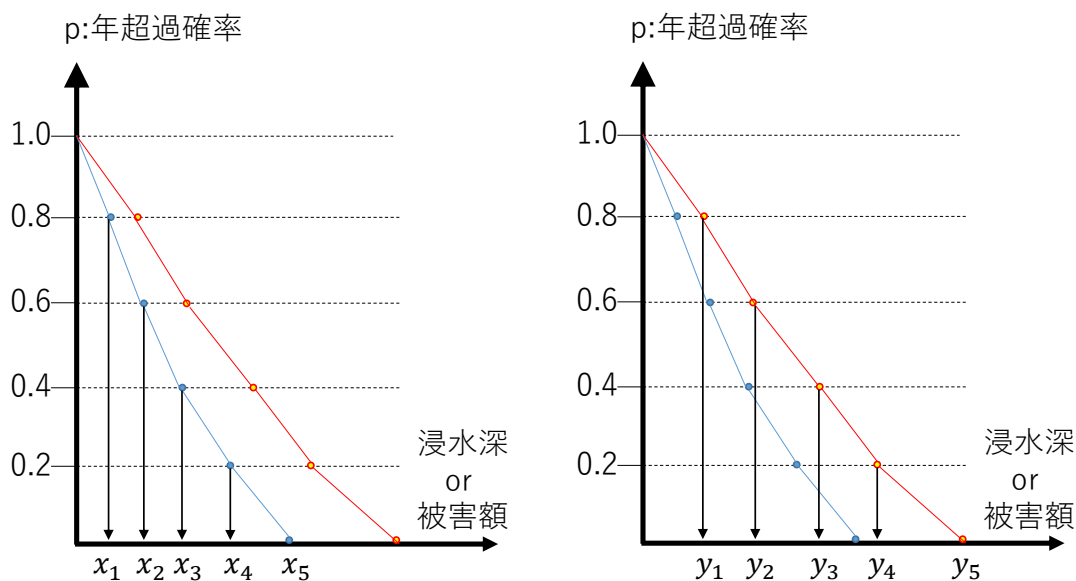


図 4-35 曲線離散化の例

任意の年超過確率曲線が  $N$  次元ベクトルに離散化されるため、すべての年超過確率曲線は  $N$  次元ベクトル空間の要素と対応する。このとき、 $N$  次元ベクトルに関する距離関数として、 $a$  次のノルムを下式のように定義することができる。なお、本研究では一般的なノルム定義である  $a = 2$  のユークリッドノルムを採用する。

$$\|\vec{d}\| = \|\vec{x} - \vec{y}\| = \left( \sum_i |x_i - y_i|^a \right)^{1/a} \quad \dots \text{式(4-17)}$$

上記の操作により、年超過確率曲線のクラスタリングが可能となる。

### 4-4-3. 各手法の適用範囲

曲線形状のクラスタリングは年超過確率曲線の形状という確率的特徴を任意の N 次元ベクトルに変換するため、N の値を十分大きく取れば、情報量の損失は少ない。一方で、寄与率に基づく類型化は、曲線左下領域を 3 つの領域に分割したときのそれぞれの面積を用いるため、曲線形状が 3 次元に圧縮され、情報量の損失が生じることとなる。すなわち、曲線形状のクラスタリングのほうが、確率的特徴をより厳密に考慮することができるといえる。

一方で、曲線形状のクラスタリングは計算負荷が課題となる。一般にクラスタリングの計算量は曲線数  $n$  に対して  $n^3$  であり、分析対象領域が広すぎる場合や解像度が高すぎる場合、計算が実用的な時間内に終了しない恐れがある。一方で、寄与率に基づく類型化は曲線間の比較を行わないため、計算量は曲線数  $n$  に対して  $n$  である。すなわち、曲線数が多い場合には、寄与率に基づく類型化手法の使用が望ましい。

上述の各手法の利点を踏まえた、水害リスクカーブと水害ハザードカーブという 2 種類の異なる年超過確率曲線に対する各分析手法の適用可能性を表 4-10 に示す。

表 4-10 2 種類の分析手法の適用可能性

		曲線形状の クラスタリング	寄与率に基づく 類型化
ハザードカーブ		○	×
リスクカーブ	1つの土地利用年代	○	○
	複数の土地利用年代	△	○

水害ハザードカーブは曲線左下の面積が実質的意味を持たないため、寄与率に基づく類型化手法は適用できない。したがって、水害ハザードカーブは、曲線形状のクラスタリングを適用する必要がある。

一方で、水害リスクカーブは曲線左下の面積を利用した寄与率に基づく類型化手法が適用可能である。また、曲線形状のクラスタリングも水害ハザードカーブと同様に適用可能である。なお、図 4-33 に示すように、各セルの水害リスクカーブは異なる土地利用年代についてそれぞれ別々に算出されるため、複数の土地利用年代の水害リスクカーブ群すべてを対象に分析を行うことで、水害リスクの地理的構造の経年変化を考察することも考えられる。しかしながら、分析対象の水害リスクカーブの本数が極端に多い場合、クラスタリングの適用は難しくなるため、寄与率に基づく類型化の適用が望ましい場合もある。

このように、本研究で提案する 2 種類の分析手法は、それぞれが異なる利点と適用範囲を持つため、分析対象に合わせた手法の選択が必要となる。

## 4-5. 地理的構造の分析手法①：水害ハザードカーブに基づく分析

本節では、計算対象フレーム内の各セルについて算出した水害ハザードカーブに基づいて、対象領域における水害ハザードの地理的構造を分析する。表 4-10 に示す通り、水害ハザードカーブに対しては曲線形状のクラスタリングのみが適用可能であるため、本節ではクラスタリングの結果を用いた地理的構造化結果を分析していく。

### 4-5-1. クラスタリング自体の結果および検討クラスタ数の決定

各セルの水害ハザードカーブは各セルの 1500 仮想年に関する年最大浸水深を順序化することで求められている。曲線形状を保ちつつ計算負荷を少なく抑えるため、本節での離散化次元数は  $N=150$  とした。また、計算対象フレームは 30m グリッドで約 22 万セルであるが、22 万要素の階層的クラスタリングは計算負荷が大きすぎたため<sup>24</sup>、60m グリッドの約 5.6 万セルにアップスケールした水害ハザードカーブを用いた<sup>25</sup>。

クラスタリングの手法は階層的クラスタリングと非階層的クラスタリングに大別されるが、本研究では階層的クラスタリングの Ward 法を選択した。階層的クラスタリングは結果の各クラスタに含まれる要素数に関する事前の仮定を必要とせず、各クラスタ間の要素数が異なることが予想される本研究に適している。また、Ward 法は鎖効果が発生しづらく、標準的に用いられるクラスタリング手法である。

クラスタリング結果の樹形図を図 4-36 に、残クラスタ数と結合距離の関係を図 4-37 に、平均クラスタサイズと結合距離の関係を図 4-38 に示す。樹形図（図 4-36）から鎖効果は生じていないことがわかり、信頼性の高い結果となっていると考えられる。本研究では流域内で大まかな地理的構造に着目し、これらの図の特徴から、クラスタ数 5 の場合の結果に着目した分析を行う<sup>26</sup>。

### 4-5-2. 各クラスタの地理的分布と代表的ハザードカーブ

対象領域の地理的構造は図 4-39 のようになる。また、各クラスタの水害ハザードの確率的特徴を表す指標として、各クラスタに属するセルのハザードカーブを平均した代表的ハザードカーブとして図 4-40 に示す。

図 4-39 においては、各クラスタの地理的分布にはクラスタごとにまとまりがある。これについて、図 4-41 に示すように、対象領域を「谷底平野区間」と「蛇行原区間」に大別し、各クラスタについて①代表的ハザードカーブ形状から読み取れる確率的ハザード特性、②谷底平野区間での地理的分布、③蛇行原区間での地理的分布、を表 4-11 に整理した。

---

<sup>24</sup> メモリ容量 128GB の PC を用いたが、メモリ不足となった。

<sup>25</sup> 各仮想年について、アップスケール後の 1 セルに含まれるアップスケール前の 4 セルの年最大浸水深の平均値を算出し、アップスケール後の年最大浸水深とした。

<sup>26</sup> クラスタリング結果からクラスタ数を決定する際の客観的な基準はなく、分析の目的にしたがって分析者がクラスタ数を主観的に決定することとなる。

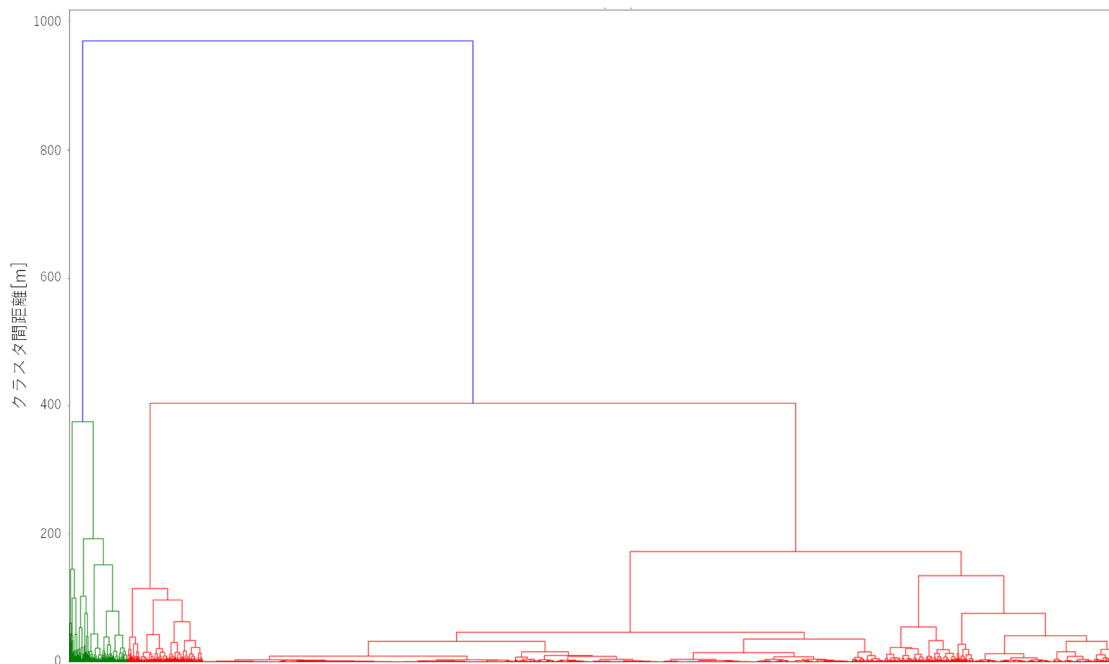


図 4-36 クラスタリング結果の樹形図

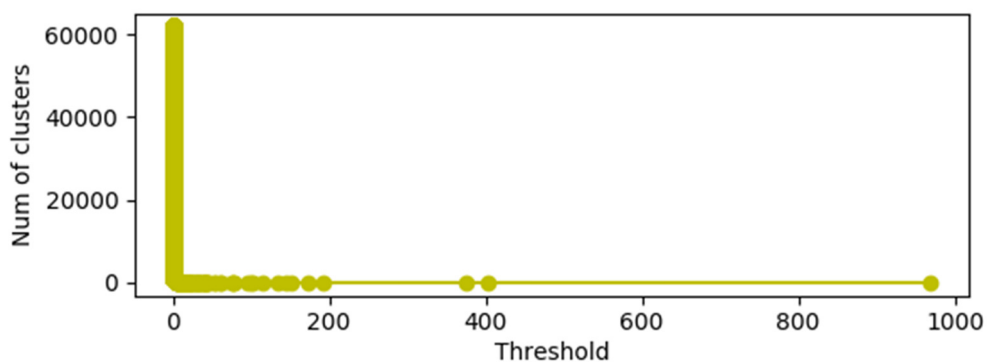


図 4-37 残クラスタ数と結合距離の関係

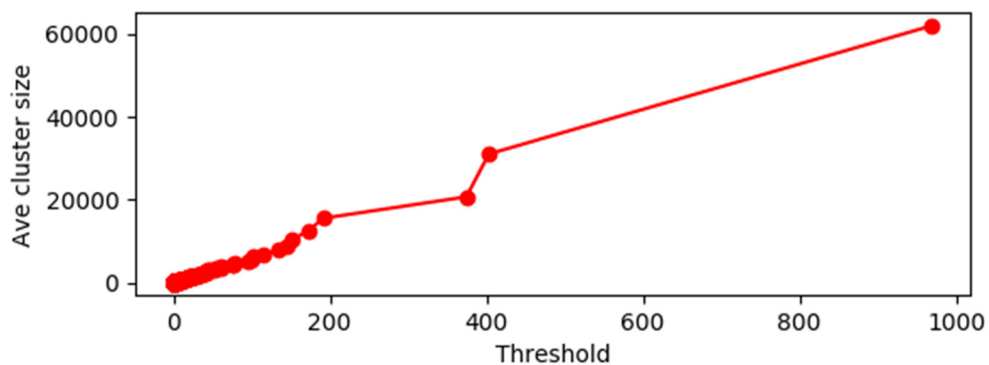


図 4-38 平均クラスタサイズと結合距離の関係



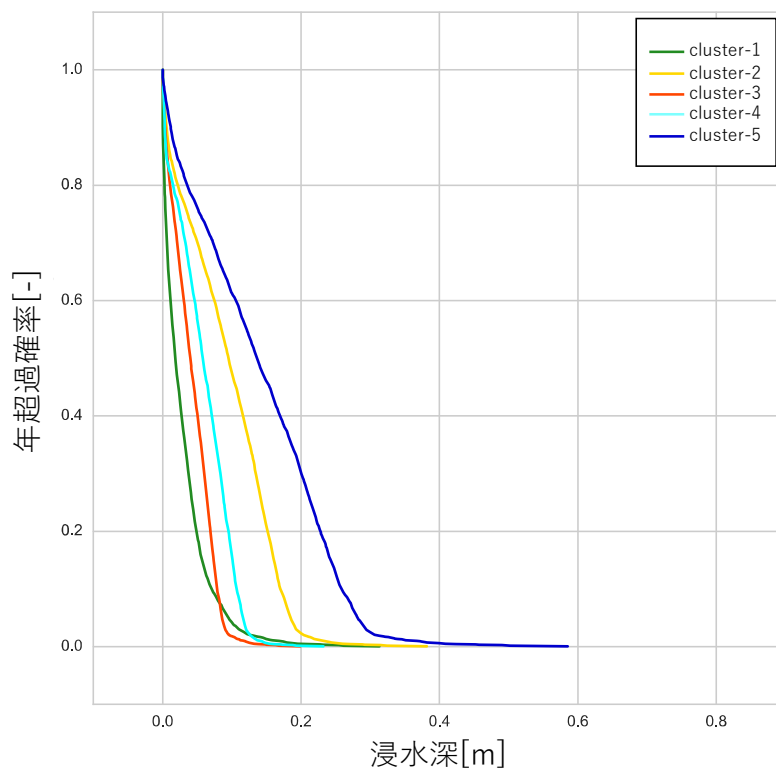


図 4-40 各クラスターの代表的ハザードカーブ

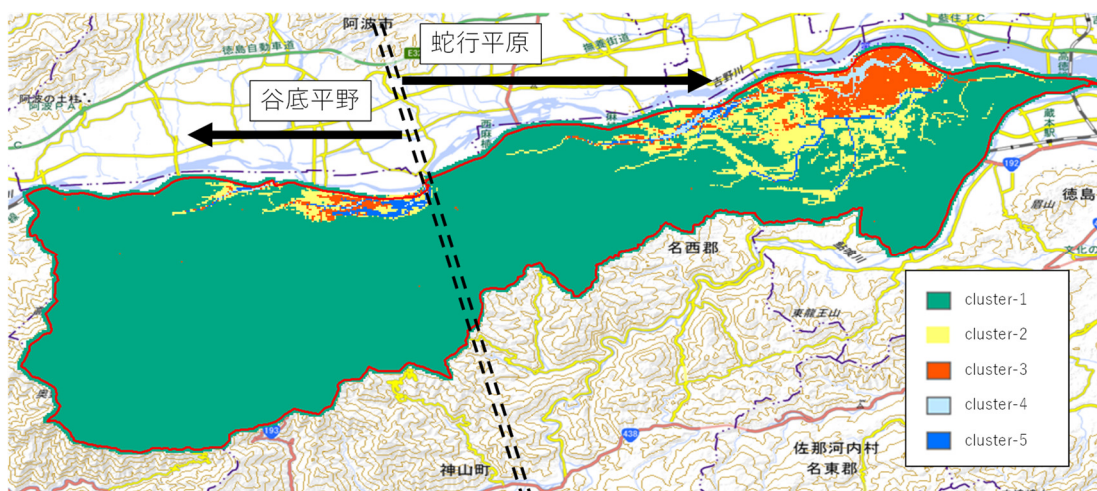


図 4-41 クラスタリング結果（クラスター数5）と谷底平野・蛇行原の別

表 4-11 各クラスタの特徴

		山地部	平地部				
		クラスタ1	クラスタ2	クラスタ3	クラスタ4	クラスタ5	
①代表的HC形状に基づく 確率的ハザード特性	形状	曲線的	直線的	直線的	直線的	直線的	
	閾値	不明瞭	明瞭(p≒0.03)	明瞭(p≒0.03)	明瞭(p≒0.03)	明瞭(p≒0.03)	
②谷底平野領域での 地理的特徴	分布領域	ブロック上流側	ブロック中上流部	ブロック中下流部	あまりない	ブロック最下流部 および 支川河道沿い	
	領域形状	面状	面状	島状	—	帯状	
③氾濫平原領域での 地理的特徴	分布領域	ブロック上流側	ブロック中流部	ブロック中下流部	ブロック中下流部 (クラスタ3内部)	ブロック中下流部 支川河道とほぼ一致	
	領域形状	面状	面状・帯状	島状	帯状	線状	

各クラスタの詳細を以下に述べる。

### 【クラスタ1（緑）】

図 4-39 および図 4-40 において緑色で示したクラスタ1は主として森林部（山地部）に分布している。図 4-42 に森林部を黒くマスクしたクラスタ分布地図を示す。森林部（山地部とほぼ等しい）のほぼ全域がクラスタ1に属していることが読み取れる。また、図 4-43 に非森林部（平野部とほぼ等しい）を黒くマスクしたクラスタ分布地図を示す。大きな支川が流れていない対象領域西端の旧山川町（吉野川）や対象領域中心の旧鴨島町（吉野川）など、氾濫ブロックの上流部側にクラスタ1が分布している。また、対象領域東側の鮎喰川堤防沿いにもクラスタ1が分布している。鮎喰川堤防沿いは鮎喰川のデルタファン性扇状地の領域にあたり、吉野川の蛇行平原に比べて標高が高い。このことから、**クラスタ1は「山地部」および「氾濫ブロックごとの支川上流側領域」のクラスタ**であると考えられる。

代表的ハザードカーブの形状から読み取れることとは以下の通りである。年超過確率が0.1より大きい段階、すなわち再帰期間が10年以下の領域では、他のクラスタの代表的ハザードカーブより左側に存在し、想定される浸水深が小さく、また年超過確率が小さくなったときの浸水深の増大が緩やかである。一方で、年超過確率が0.1より小さくなると、年超過確率が小さくなったときの浸水深増大が他のクラスタの代表的ハザードカーブより急である。したがって、「頻繁に生じる再帰年の小さい浸水での浸水深は小さい一方で、再帰年10年以上の中頻度の浸水で浸水深が大きくなる」という特徴がある。

他の4つのクラスタの代表的ハザードカーブが年超過確率0.03付近で折れた直線な形状であるのに対し、クラスタ1は代表的ハザードカーブが曲線的である。この形状の差異は、他の4つのクラスタは、それ以上の災害規模に対して浸水深が急増する災害規模の閾値が存在するのに対し、クラスタ1には明瞭な閾値が存在しないことを示していると考えられ



る。これは、他の4つのクラスタが平地部を主な領域とし、支川からの氾濫水が影響するのに対し、クラスタ1は主に山地部であるため、支川からの氾濫水の影響が少なく、流出時の浸水深が支配的であるからだと考えられる。

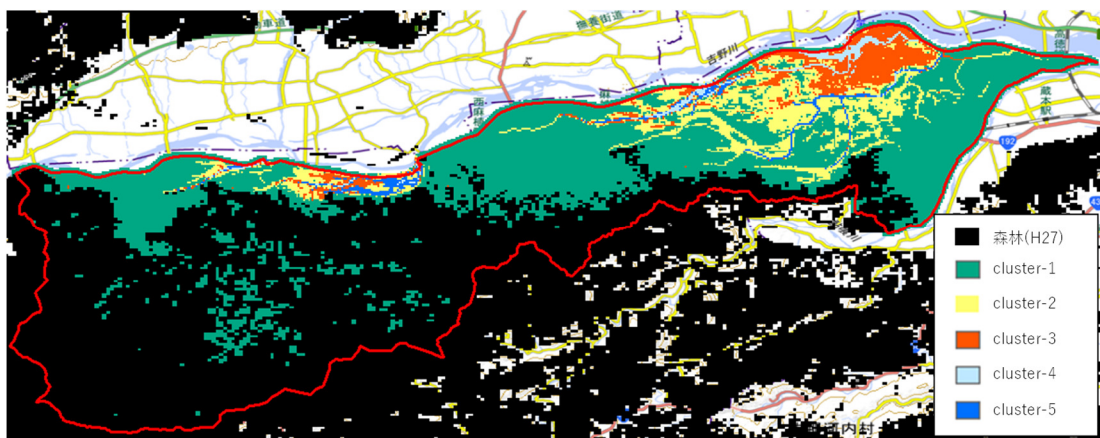


図 4-42 森林部をマスクしたクラスタリング結果（クラスタ数5）

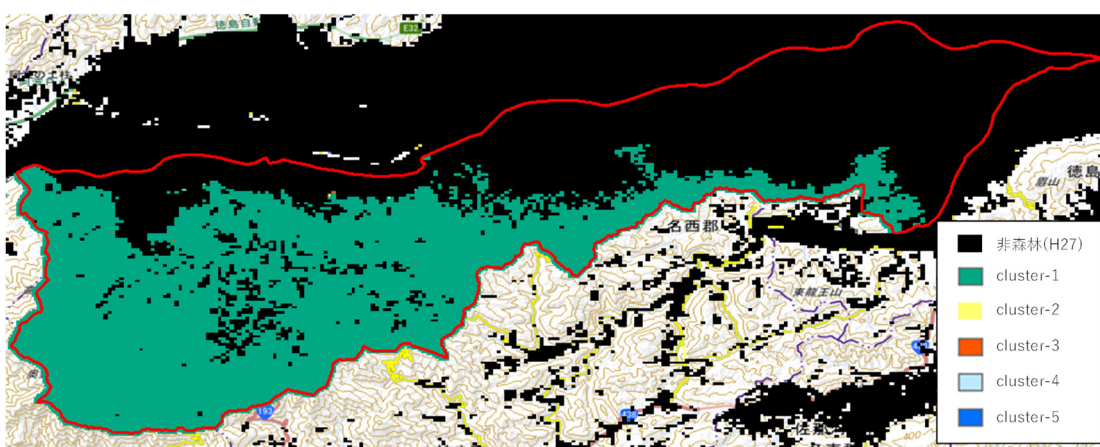


図 4-43 非森林部をマスクしたクラスタリング結果（クラスタ数5）

#### 【クラスタ2（黄色）】

図 4-39 および図 4-40 において黄色で示したクラスタ2は、対象領域上流側の吉野川市旧川島町・旧山川町と、対象領域下流側では異なる分布をしている。図 4-41 左側の谷底平野領域において、クラスタ2は主に狭い谷底平野の中・上流側に分布している。一方で、図 4-41 右側の蛇行平原領域において、クラスタ2は支川河道沿いの低地に帯状に分布している。

代表的ハザードカーブの形状から読み取れることは以下の通りである。どのような年超過確率に対しても、浸水深がクラスタ5より小さく、一方でクラスタ2および3より大き

い。年超過確率 0.03 以上では直線的であり、年超過確率の減少に対して浸水深が緩やかに増大するが、年超過確率が 0.03 付近を境に年超過確率の減少に対する浸水深の増大率が大きくなる。すなわち、再帰期間が約 30 年以上程度の災害規模が閾値となり、それ以上に大きな規模の災害に対しては浸水深が急激に増大するという確率的リスク特性が読み取れる。このような災害規模の閾値の存在は、クラスタ 2~5 のすべての代表的ハザードカーブからも読み取れる。浸水深が急増する閾値の存在の理由として、クラスタ 2~5 は主に平地部に存在するため、ある一定規模以上の災害規模では支川河道からの氾濫水が浸水に対して支配的になるためであると考えられる。

#### 【クラスタ 3 (橙色)】

図 4-39 および図 4-40 において橙色で示したクラスタ 3 は、対象領域上流側の吉野川市旧川島町・旧山川町と、対象領域下流側では異なる分布をしている。図 4-41 左側の谷底平野領域において、クラスタ 2 は主に狭い谷底平野の中流部に位置している。一方で、図 4-41 右側の蛇行平原領域において、クラスタ 2 は本川堤防と支川河道に挟まれて島状に分布している。

代表的ハザードカーブの形状から読み取れることは以下の通りである。どのような年超過確率に対しても、浸水深がクラスタ 2,4,5 より小さい。一方でクラスタ 2 および 3 より大きい。年超過確率 0.03 以上では直線的であり、年超過確率の減少に対して浸水深が緩やかに増大するが、年超過確率が 0.03 付近を境に年超過確率の減少に対する浸水深の増大率が大きくなる。すなわち、再帰期間が約 30 年以上程度の災害規模が閾値となり、それ以上に大きな規模の災害に対しては浸水深が急激に増大するという確率的リスク特性が読み取れる。このような災害規模の閾値の存在は、クラスタ 2~5 のすべての代表的ハザードカーブからも読み取れる。

#### 【クラスタ 4 (水色)】

図 4-39 および図 4-40 において水色で示したクラスタ 4 は、対象領域上流側の吉野川市旧川島町・旧山川町にはほとんど分布せず、一方で対象領域下流側では、クラスタ 3 の島状領域内部において帯状に分布している。

代表的ハザードカーブの形状から読み取れることは以下の通りである。どのような年超過確率に対しても、浸水深がクラスタ 2 およびクラスタ 5 より小さく、一方でクラスタ 3 より大きい。年超過確率 0.03 以上では直線的であり、年超過確率の減少に対して浸水深が緩やかに増大するが、年超過確率が 0.03 付近を境に年超過確率の減少に対する浸水深の増大率が大きくなる。すなわち、再帰期間が約 30 年以上程度の災害規模が閾値となり、それ以上に大きな規模の災害に対しては浸水深が急激に増大するという確率的リスク特性が読み取れる。

### 【クラスタ 5 (青色)】

図 4-39 および図 4-40 において青色で示したクラスタ 5 は、対象領域上流側の吉野川市旧川島町・旧山川町と、対象領域下流側では異なる分布をしている。図 4-41 左側の谷底平野領域において、クラスタ 5 は主に狭い谷底平野の下流末端部に面状に分布している。一方で、図 4-41 右側の蛇行平原領域において、クラスタ 2 はクラスタ 3 の橙色島状領域の南部やクラスタ 2 の内部において細い線状に分布している。この線形は主要支川である飯尾川の現河道と一致する。

代表的ハザードカーブの形状から読み取れることとして、どのような年超過確率に対しても、他のクラスタと比べて浸水深が大きい。年超過確率 0.03 以上では直線的であり、年超過確率の減少に対して浸水深が緩やかに増大するが、年超過確率が 0.03 付近を境に年超過確率の減少に対する浸水深の増大率が大きくなる。すなわち、再帰期間が約 30 年以上程度の災害規模が閾値となり、それ以上に大きな規模の災害に対しては浸水深が急激に増大するという確率的リスク特性が読み取れる。

以上の検討から、計算対象フレーム内の各セルに関する水害ハザードカーブ群を、曲線形状のクラスタリングによって、代表的な水害ハザードカーブから読み取れる水害リスク特性が異なる 5 つのクラスタとして分類した。また、各クラスタに属するセルの計算対象フレーム内での分布を可視化した結果、各クラスタがまとまって分布しており、かつ、各クラスタの地理的分布特性が異なることが明らかとなった。本章で検討した手法は、確率的ハザード特性の地理的構造化に用いることができると考えられる。

## 4-6. 地理的構造の分析手法②：水害リスクカーブに基づく分析

本節では、計算対象フレーム内の各セルについて求めた水害リスクカーブに基づき、水害リスクの地理的構造を分析する。前節で着目した水害ハザードカーブとの相違点として、水害リスクカーブは曲線左下領域の面積に「対応する年超過確率の外力規模の災害による被害額期待値」という実質的意味がある。そのため、曲線形状自体のクラスタリングの他に、第2章・第3章で用いた「再帰期間ごとの水害リスク寄与率」に基づいた類型化を用いた地理的構造の分析が可能である。本節では後者の手法に基づいた水害リスクの地理的構造の抽出を試みる。これは、本研究の計算対象フレームのセル数（約22万）では、複数年年代のリスクカーブ群を一度にクラスタリングすることが難しいためである。

### 4-6-1. 再帰期間ごとの被害額期待値のリスク寄与率に基づく類型化結果

再帰期間ごとの水害リスク寄与率の考え方や、算出・図示の方法等は2-2で示したものと同様であるため、本節内では解説しない。6つの土地利用年代の全リスクカーブについてプロットした図をに示す。また、それぞれの土地利用年代に関する類型ごとの分布を図4-45から図4-50に示す。

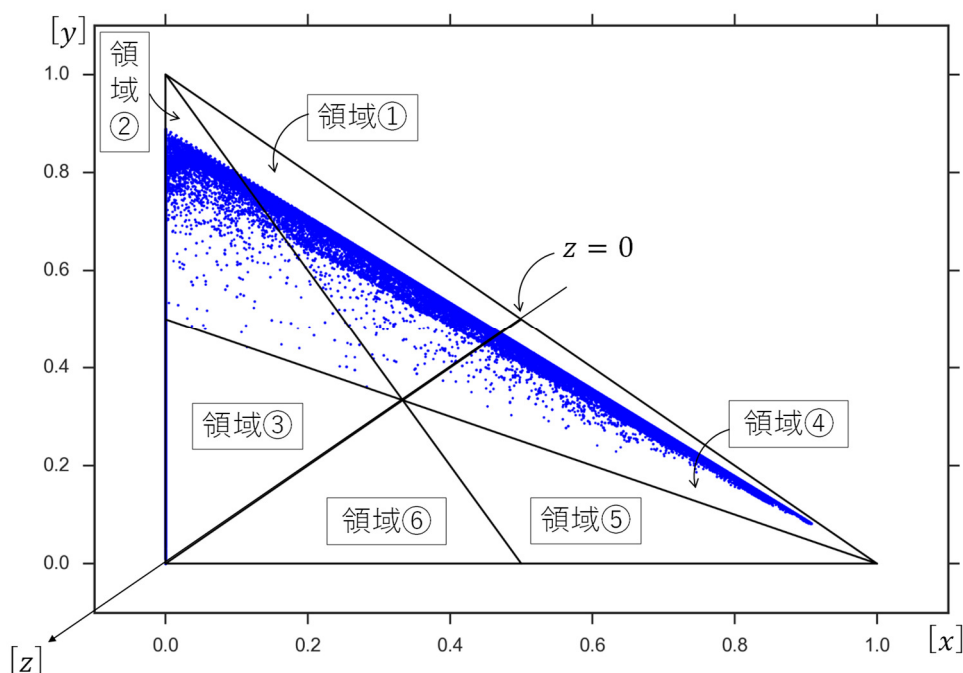


図 4-44 全土地利用年代・全セルの再帰期間ごとの内外水リスク寄与率



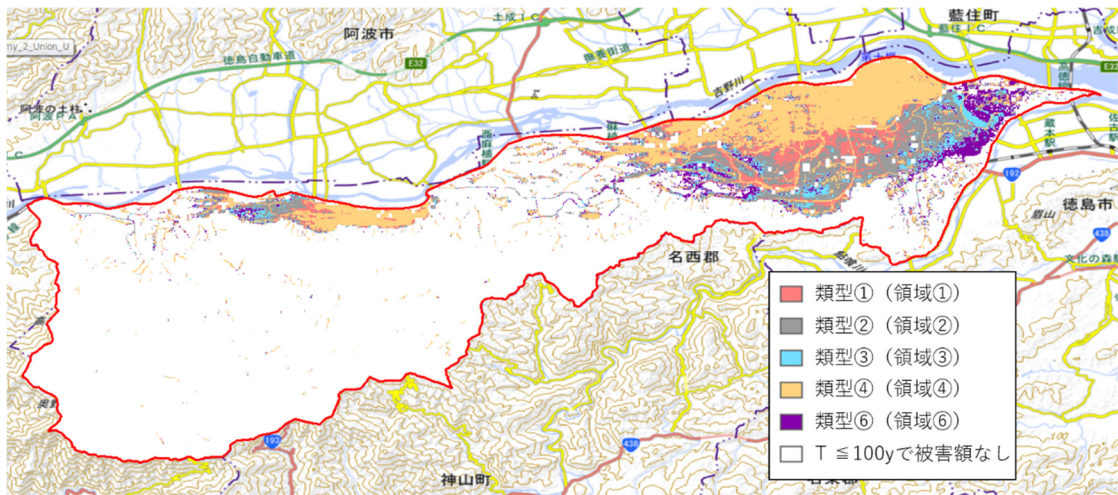


図 4-45 1976年（昭和51年）の土地利用に基づく水害リスクの構造

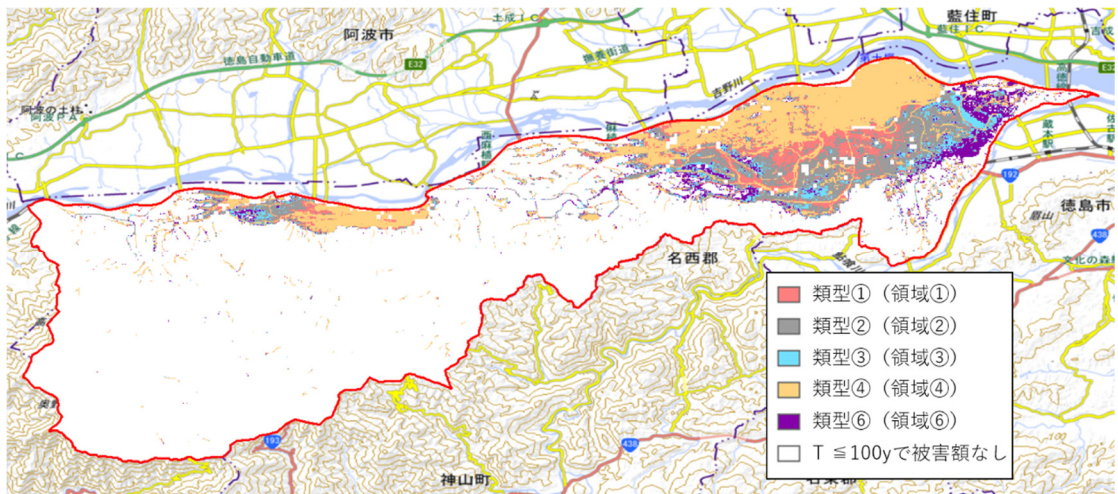


図 4-46 1987年（昭和62年）の土地利用に基づく水害リスクの構造

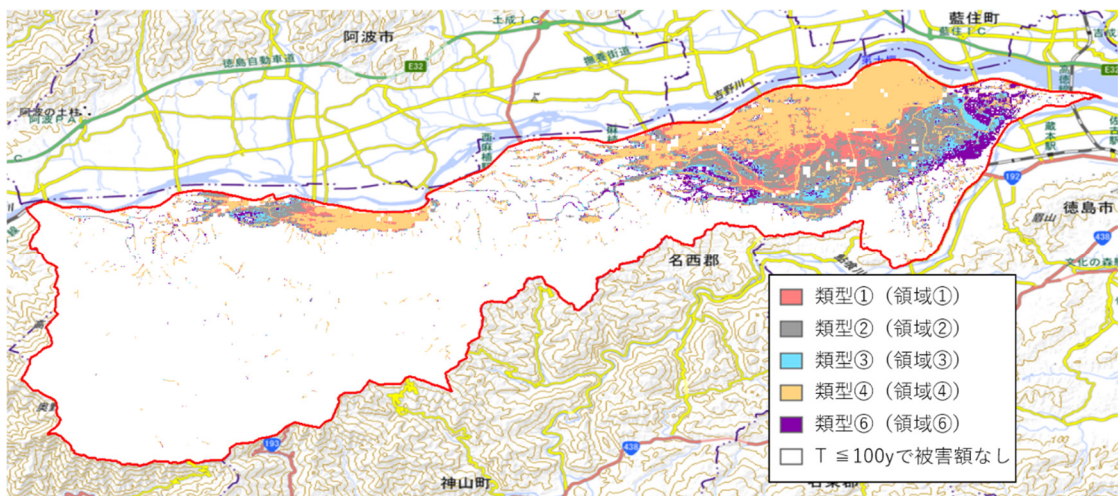


図 4-47 1991年（平成3年）の土地利用に基づく水害リスクの構造



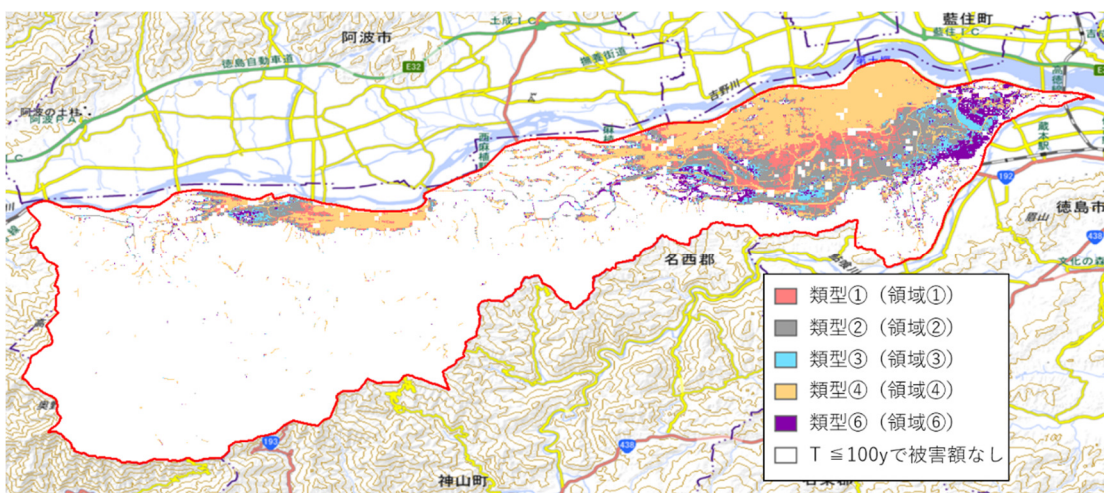


図 4-48 1997年（平成9年）の土地利用に基づく水害リスクの構造

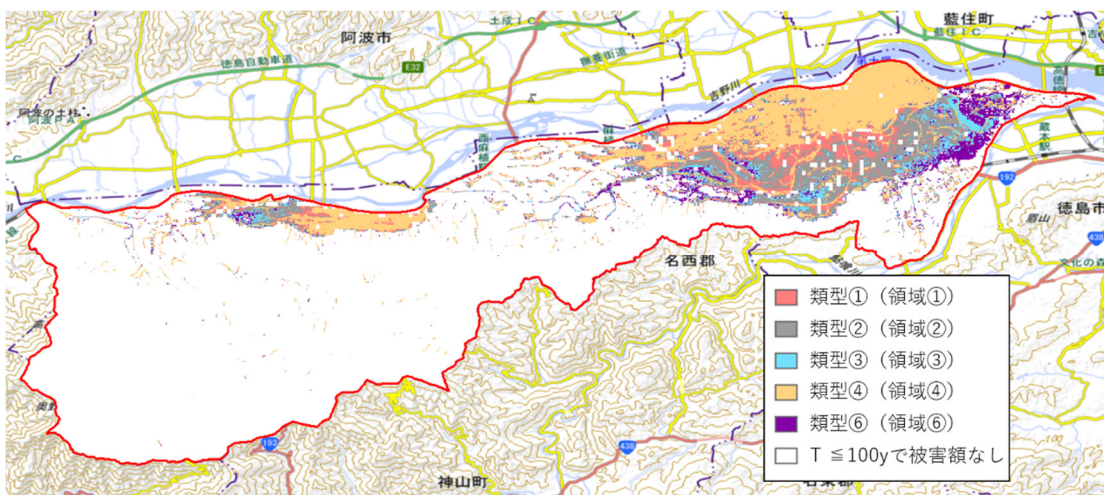


図 4-49 2006年（平成18）の土地利用に基づく水害リスクの構造

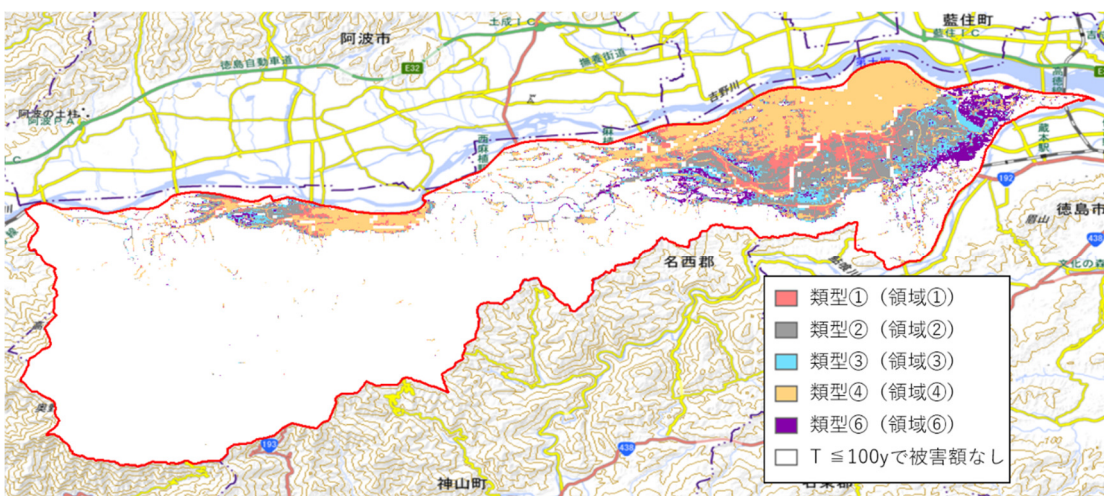


図 4-50 2014年（平成26）の土地利用に基づく水害リスクの構造

図 4-45 から図 4-50 に示すとおり、年代ごとの水害リスクの地理的構造には大きな変化がないことが読み取れる。一方で、に示す年代ごとの土地利用からは、対象領域内部において農地の建物用地転用が進んでいることが読み取れる。このように、土地利用が変化しても、再帰期間ごとのリスク寄与率に基づく水害リスクの地理的構造が変化しない要因としては、a)再帰期間ごとのリスク寄与率は割合のみを考慮し、年被害額期待値（すなわち総リスク推定値）が異なる場合でも、再帰期間ごとのリスク寄与率が同程度ならば同一の類型に分類されること、b)各土地利用について浸水深から被害額を推定する式形が「資産評価額×浸水深別被害率」であり、かつ浸水深別被害率関数が土地利用によって大きく変わらないことが考えられる。すなわち、年代が進んであるセルの土地利用が変化した場合にも、資産評価額が変化することで年被害額期待値は変化するが、水害リスクカーブの形状は概ね各超過確率について定数倍されるのみで、本節で用いている手法においては類型の変化は生じない場合が多いと考えられる。

なお、水害リスクの確率的情報が失われてしまうものの、各土地利用年代について年被害額期待値を求め、その地理的分布を図 4-51 から図 4-56 に示した。こちらの分布では、資産評価額が大きい建物用地セルにおいて年被害額期待値が大きく想定されており、特に1991年（平成3年）以降は建物用地の広がりに合わせて橙・赤色で示された年被害額期待値が10万円以上のセルが広がっていく様子が読み取れる。この年被害額期待値が大きいセルの分布の広がりには、図 4-45 から図 4-50 においては類型の変化として反映されていない。したがって、再帰期間ごとのリスク寄与率に基づく類型化は、リスクの絶対量よりもその被害率の確率的特徴に基づいて地理的構造化を行っていると考えられる。



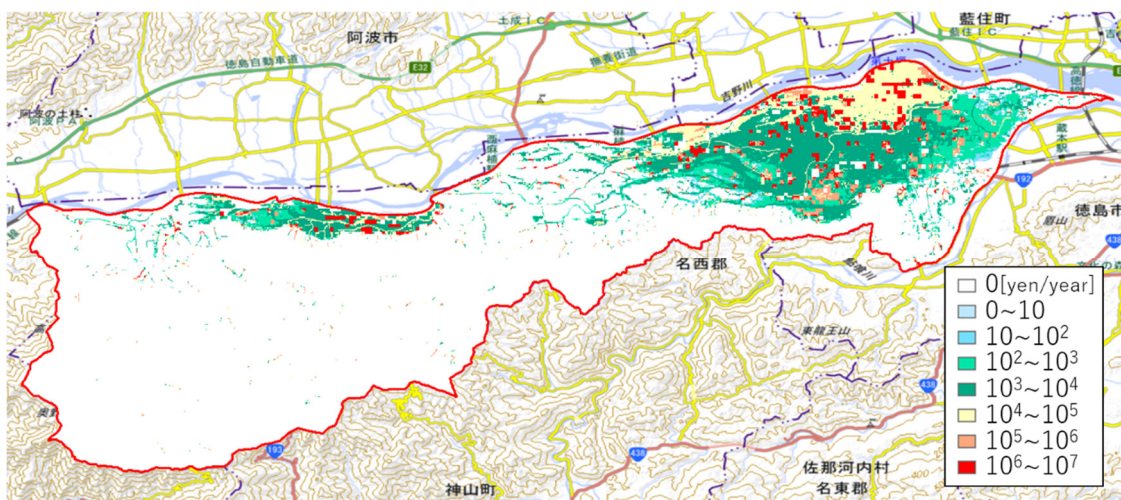


図 4-51 1976年（昭和51年）の土地利用に基づく年被害額期待値分布

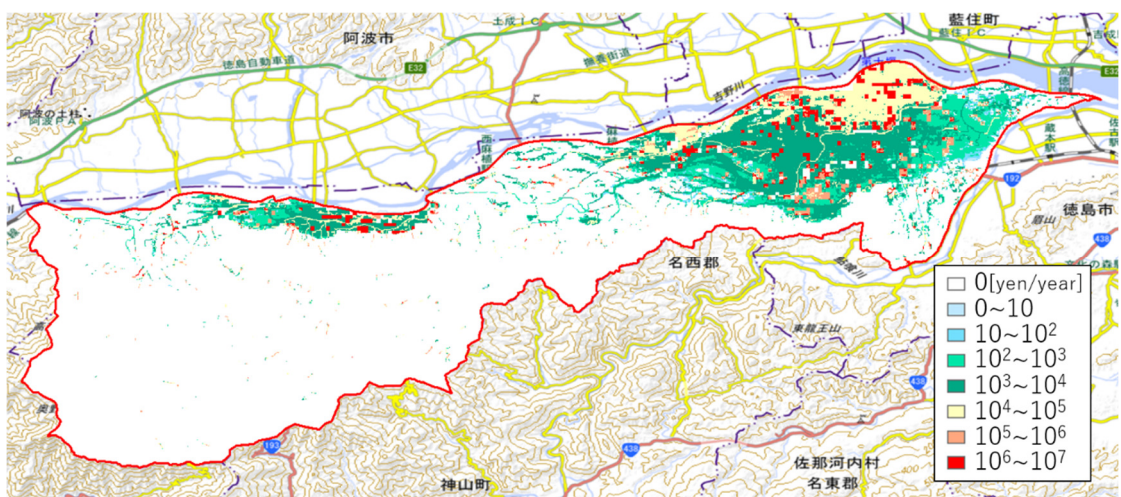


図 4-52 1987年（昭和62年）の土地利用に基づく年被害額期待値分布



図 4-53 1991年（平成3年）の土地利用に基づく年被害額期待値分布





図 4-54 1997年（平成9年）の土地利用に基づく年被害額期待値分布

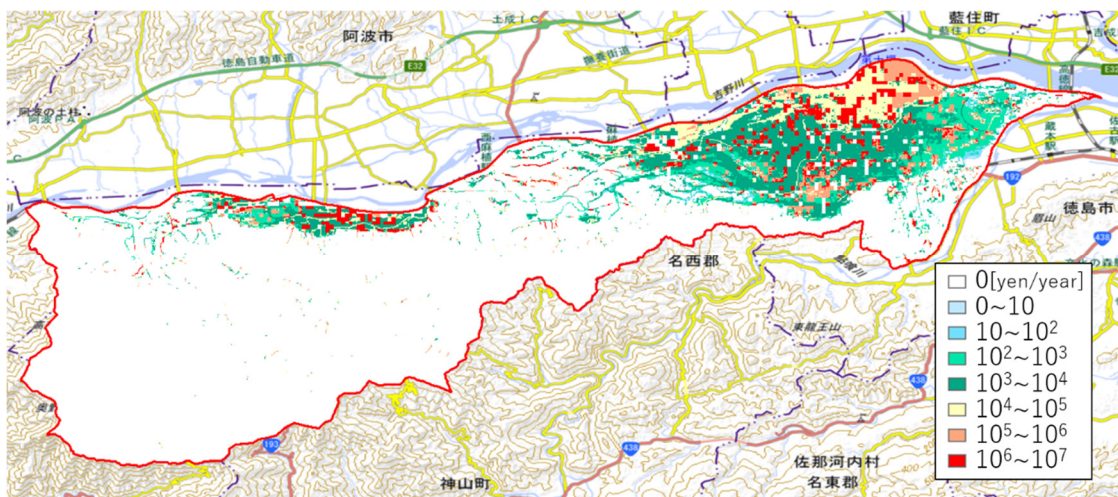


図 4-55 2006年（平成18年）の土地利用に基づく年被害額期待値分布



図 4-56 2014年（平成26年）の土地利用に基づく年被害額期待値分布

#### 4-6-2. 氾濫ブロックごとの水害リスクの地理的構造の違い

水害リスクカーブを用いた再帰期間ごとのリスク寄与率による類型化では、図 4-45～図 4-50 から読み取れるように、土地利用年代の変化による地理的構造の大きな変化は見られない。そこで、2014年（平成26年）の土地利用に基づいた地理的構造に着目し、谷底平野区間の氾濫ブロックと、蛇行平原区間の氾濫ブロックのそれぞれで詳しく分析する。

谷底平野区間に関する図 4-50 の拡大図を図 4-57 に示す。この領域においては、上流側である西端から下流側である東端に向けて次第に類型が移り変わる。ほたる川下流のブロックでは、上流側に類型②・類型③・類型⑥がまとまって分布している。特に類型⑥・類型③が類型②より上流側に存在する。その下流側にはわずかに類型①が分布し、さらに下流側には類型④が分布する。すなわち、谷底平野区間においては、上流側から下流側に向けて確率的リスク特徴の類型が変化するという地理的構造が見出された。

ハザードカーブのクラスタリングによる地理的構造結果の拡大図を図 4-58 に示す。図 4-57 と図 4-58 の比較から、リスクカーブの類型化による地理的構造化結果と、ハザードカーブのクラスタリングによる地理的構造化の結果においては、似通った構造が抽出されていることが読み取れる。リスクカーブに基づく類型②・類型③・類型⑥の分布域は、ハザードカーブに基づくクラスタ1の平野部と重複する。また、リスクカーブに基づく類型①の分布域は、ハザードカーブに基づくクラスタ2の分布域とほぼ同様であり、リスクカーブに基づく類型④の分布域と、ハザードカーブに基づくクラスタ3・クラスタ5の分布域がほぼ同様となる。また、クラスタ3はクラスタ5より上流側に存在する傾向がある。これらの大まかな対応を表 4-12 に示す。類型の数とクラスタの数が異なり、また類型化の際の基準となる再帰期間もクラスタリングとは対応していないため、クラスタと類型に厳密な対応付を行うことは出来ないが、どちらも「上流から下流に向けて縦断的に確率的リスク特性／確率的ハザード特性が移り変わる」という地理的構造を抽出している。

表 4-12 谷底平野区間のリスク・ハザードの地理的構造概要

上流(西) ↑ ↓ 下流(東)	谷底平野区間	HCの クラスタリング	RCの類型化
	上流部	C-1	⑥ ② ③
中流部	C-2	①	
下流部	C-3 C-5	④	

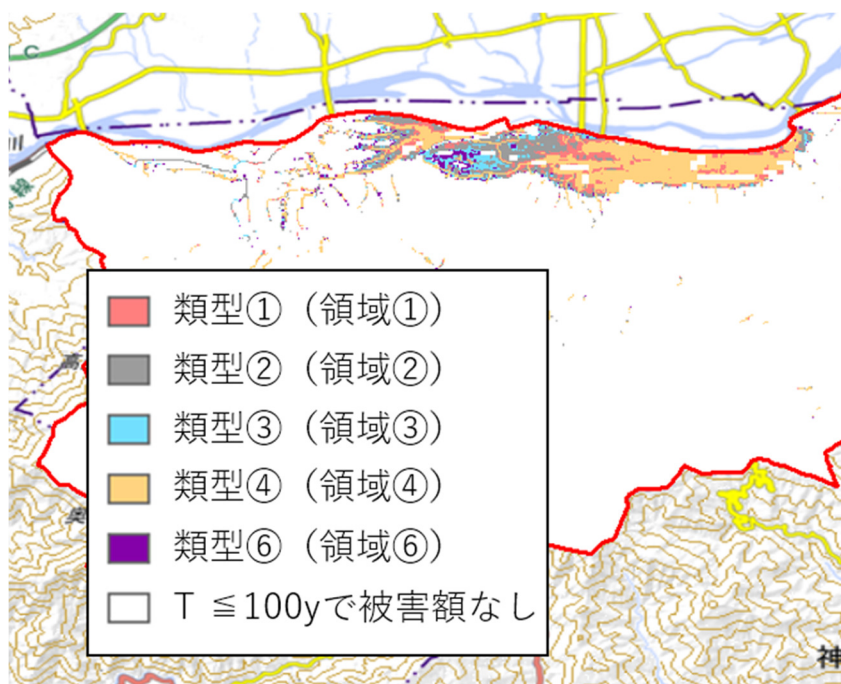


図 4-57 谷底平野区間に関する図 4-50 の拡大図

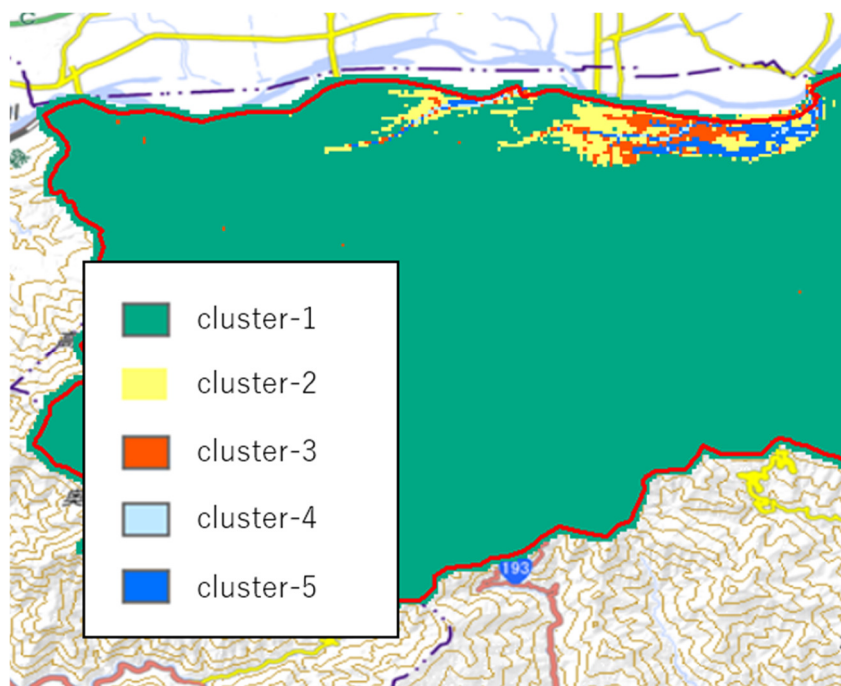


図 4-58 谷底平野区間に関する図 4-39 の拡大図



続いて、蛇行平原区間に関する図 4-50 の拡大図を図 4-59 に示す。この領域においては、北部の吉野川本川堤防に隣接するように、東西に長い面上に類型④が広がっている。その南側の大半は同様に東西に長い面上の類型②の領域であり、類型④と類型②の中間に類型①の領域が細い帯状に分布している。類型③および類型⑥の領域は類型②の領域の周縁部に分布する。

ここで、ハザードカーブのクラスタリングによる地理的構造結果の拡大図である図 4-60 と図 4-59 を比較すると、類型④領域とクラスタ 3・クラスタ 4 の領域がほぼ一致し、その南部の類型①領域はクラスタ 2・クラスタ 5 と近い構造を示している。クラスタ 4 の領域はクラスタ 3 領域の内部に帯状に存在し、クラスタ 5 の領域はクラスタ 2 の領域内部に線状に存在している。さらに、類型②・類型③・類型⑥の領域が、クラスタ 1 の領域内部に分布している。クラスタ 1 領域の中で、類型②・類型③・類型⑥と支川から遠ざかり、特に類型⑥は周縁部に位置している。

これらの大まかな対応を表 4-13 に示す。類型の数とクラスタの数が異なり、また類型化の際の基準となる再帰期間もクラスタリングとは対応していないため、クラスタと類型に厳密な対応付を行うことは出来ないが、どちらも「蛇行原区間においては、本川と平行な縞模様のように、蛇行原を横断する方向に確率的リスク特性／確率的ハザード特性が移り変わる」という地理的構造を抽出している。

表 4-13 蛇行原区間のリスク・ハザードの地理的構造概要

	蛇行原区間	HCの クラスタリング	RCの類型化
南側 ↑    ↓ 北側	支川から遠い	C-1	⑥ ② ③
	支川沿い	C-2・C-5	①
	本川・支川間	C-3・C-4	④
	本川沿い		

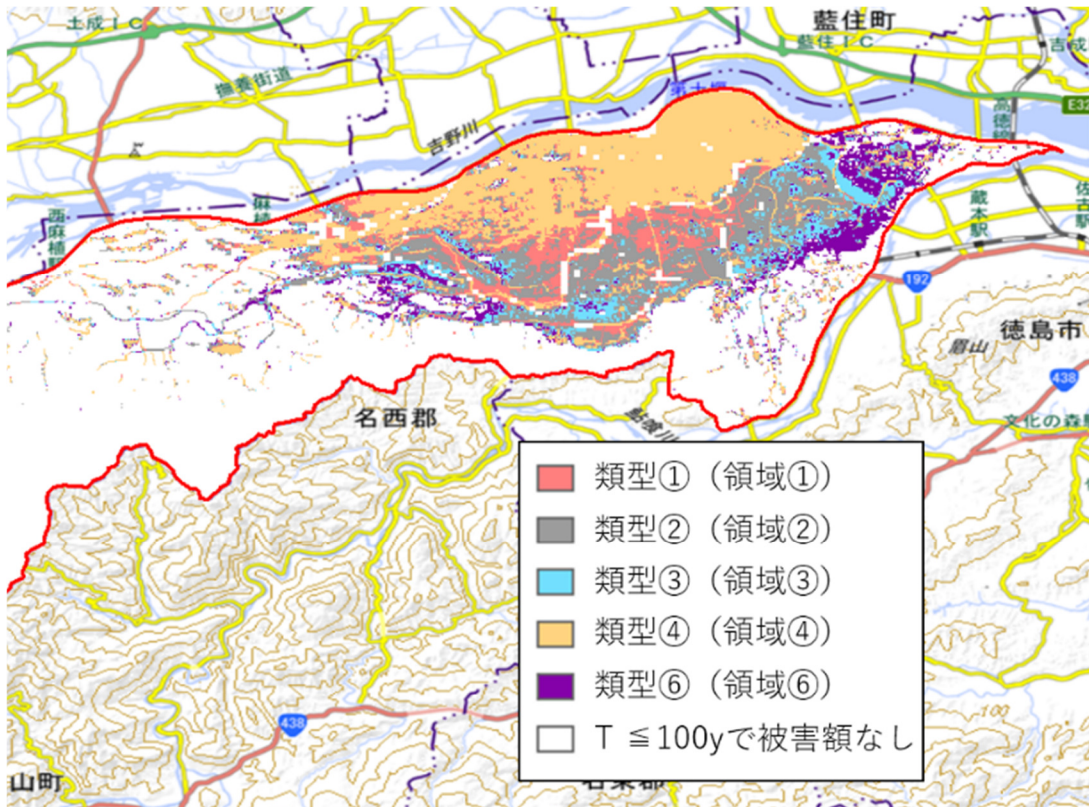


図 4-59 蛇行平原区間に関する図 4-50 の拡大図

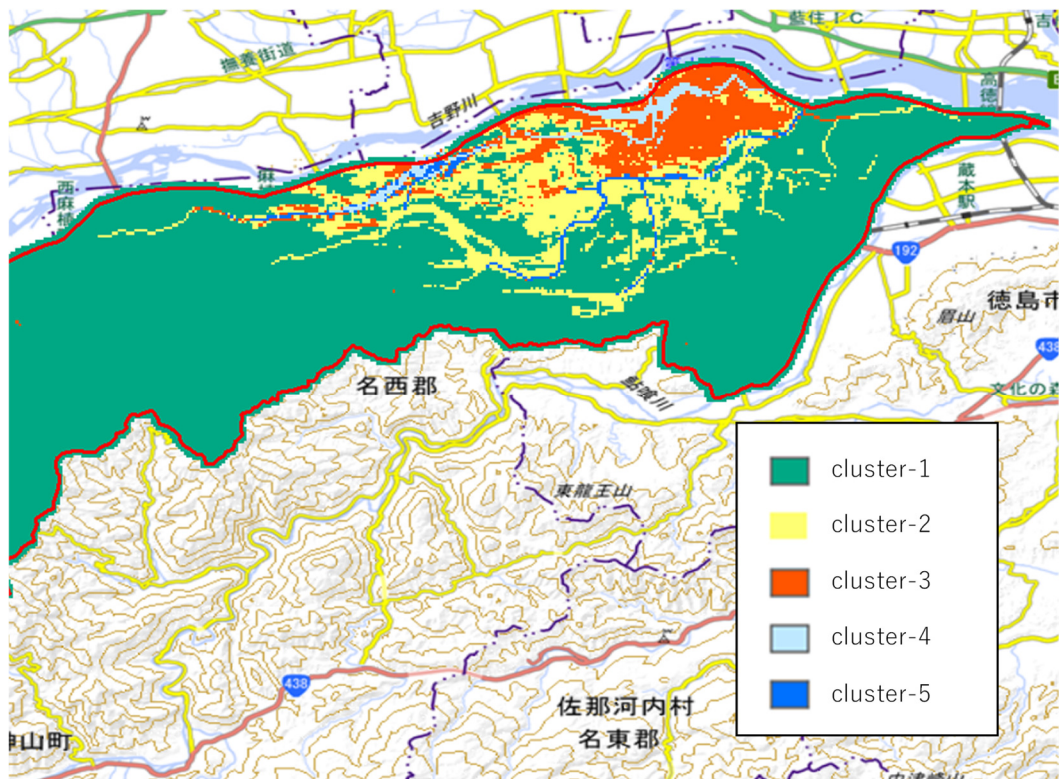


図 4-60 蛇行平原区間に関する図 4-39 の拡大図

以上の検討から、計算対象フレーム内の各セルに関する水害リスクカーブ群を、再帰期間ごとのリスク寄与率に基づく類型化によって、確率的リスク特性が異なる6つの類型に分類した。また、各類型に属するセルの計算対象フレーム内での分布を可視化した結果、各類型がまとまって分布しており、前節でのハザードカーブのクラスタリングにより抽出した地理的構造とほぼ同一の傾向を持った構造を抽出できた。さらに、谷底平野区間と蛇行平原区間で、地理的構造には差異が存在することも示唆された。

このことから、本節で分析した手法は、確率的リスク特性の地理的構造化に用いることができることが明らかになった。本章で検討した手法は、確率的リスク特性の地理的構造化に用いることができると考えられる。



#### 4-7. 本章のまとめ

本章では、吉野川水系中下流部右岸側の一部領域を計算対象フレームに選択し、大規模降雨アンサンブルデータ d4PDF を用いた反復氾濫解析により、30m グリッドスケールでの地先の水害リスクカーブ群・水害ハザードカーブ群を算出した。

その後、大多数の年超過確率曲線群について、その確率的特徴に基づいた分類手法として、第2章で提案した再帰期間ごとのリスク寄与率に基づく類型化に加えて、曲線群自体のクラスタリングによる類似性評価を提案した。これは、水害リスクカーブでは曲線左下領域の面積が対応する年超過確率の災害による年被害額期待値であるのに対し、水害ハザードカーブでは曲線左下領域の面積が実用的な意味を持たないため、寄与率手法が適用できないからである。

本研究において提案した上述の2手法の検証および適用例として、水害ハザードカーブ群に対するクラスタリング結果と、水害リスクカーブ群に対するリスク寄与率による類型化結果を、それぞれ計算対象フレーム内で地理的構造として可視化した。双方の比較から、本研究が提案した2手法はどちらも同様の地理的構造を抽出できていることが示され、その適用可能性が検証された。

さらに、谷底平野区間と蛇行平原区間では、確率的リスク・ハザード特性の地理的構造が異なることが示された。谷底平野区間では、上流から下流に向けて縦断的に確率的リスク・ハザード特性が移り変わるという地理的構造が明らかとなり、一方で蛇行平原区間では、本川に対して蛇行平原を横断する方向に確率的リスク・ハザード特性が移り変わるという地理的構造が明らかとなった。

次章では、明らかとなった確率的リスク・ハザード特性の地理的構造の要因について、地質・土砂動態・地形分類などの自然的側面と、流域の歴史的発展や治水の進展といった社会的側面の双方から検討する。



## 第5章 水害リスクの地理的構造の自然的・社会的要因の分析

本章では、前章で示した確率的リスク・ハザード特性に基づく領域内の地理的構造について、谷底平野区間と蛇行原区間のそれぞれについて、見出された地理的構造の成立に影響を与えた要因について分析する。谷底平野区間においては、上流から下流に向けて縦断的に確率的リスク・ハザード特性が変化する地理的構造が見出された。一方で蛇行原区間においては、本川を横断する方向、すなわち横断的に確率的リスク・ハザード特性が変化する地理的構造が見出された。これらの地理的構造について、地形地質などの自然的要因や、流域の歴史的発展や土地利用等の社会的要因を検討していく。

### 5-1. 自然的要因の分析

#### 5-1-1. 左右岸の地質に起因する支川扇状地の発達の差異

吉野川流域全体の地形地質に関する概要は4-1で述べた。本節では、対象領域が含まれる吉野川市中下流部について詳細を述べる。

吉野川中下流部は徳島県三好市池田付近から東に向かって中央構造線に沿って直線的に伸びる谷底平野・蛇行原を持つ。中央構造線の南北では地質が大きく異なり、内帯である北側は砂岩質の和泉層群を主体とした阿讃山脈であり、一方で外帯である南側は変成岩質の三波川帯を主体とした剣山地である。図5-1に四国地方の地質概要を示す。この南北の地質の差異に起因し、吉野川中下流部の左右岸はその地形的特徴もまた異なる。

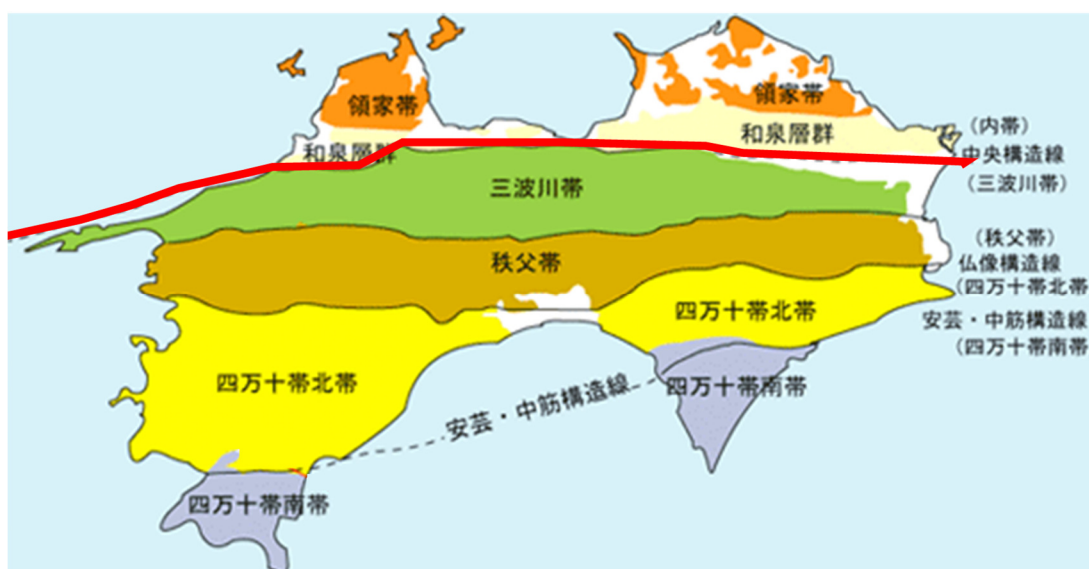


図 5-1 四国地方の地質概要図 ([64]を筆者編集)

図 5-2 に大矢らによる吉野川水系水害地形分類図[86]を示す。吉野川本川左岸側の支川群が土石流型扇状地を発達させている一方で、右岸側の支川は扇状地を形成していない。この左右岸の地形の不均衡は、南北それぞれの山地の土砂生産量の差に起因する。

左岸（北側）の和泉層群は白亜紀の砂岩が主体であり、ここに破碎帯が発達しており土砂・礫の生産が活発である[87, 88]。この活発な土砂生産が土石流型扇状地を発達させる要因となっている[89]。また、吉野川中下流部左岸側の阿讃山脈は西高東低であり、上流の左支川ほど扇状地の発達が著しい傾向にある。

一方で右岸（南側）の三波川帯はジュラ紀・白亜紀の変成岩を主体とし、外帯の付加体である。隆起領域となり標高が高く、剣山地では高峰が聳える。支川規模の左岸と比較して大きいのが、一方で地すべり帯であるものの土砂生産活動は低調であり急勾配の扇状地を形成することはない[88, 90]。

### 5-1-2. 谷底平野区間に着目した自然的要因

吉野川市川島地区より上流側の谷底平野区間においては、中央構造線に沿った本川の谷幅が未だ狭い一方で、左岸側の支川扇状地が発達しており、吉野川本川は絶えず北側から南側に向けて押し付けられるような移動圧力に晒されている[90]。一方で右支川は土砂生産量・勾配ともに小さく、本川に直角的に合流することなく<sup>27</sup>狭い氾濫原へと流れ出て、本川と平行に流下したのち緩やかに合流することとなる。

本川河道が押し付けられる南側の山塊は扇状地が存在せず、また連続的な段丘が存在しないため、局所的に北側へと突き出た岩塊や高位段丘と本川河道が接触する箇所が生じ（例：岩津、川島）、その上流部には下流端が閉塞した小氾濫原が形成される。氾濫原を本川と並行して流れる支川は下流端の閉塞部において突き出た岩塊・高位段丘により行く手を阻まれながら本川に合流するため、支川溢水と本川背水による頻繁な湛水領域を閉塞部付近に生じさせることとなる。氾濫原下流端部からの距離が浸水頻度・浸水深と関係するため、上下流方向に確率的リスク・ハザード特性が変化する縦軸型のハザード・リスク構造が生成したものと考えられる。

谷底平野区間、特に川島の山地突起部上流のハザード構造を図 5-3 に再掲する。山地突起部に阻まれた支川による湛水区画が生じていることが読み取れる。

---

<sup>27</sup> 対象領域の谷底平野区間では右支川の川田側が直角的な合流をしているが、明治期の河川整備以前は旧学村方向へと流れ出た後に本川に合流していた。

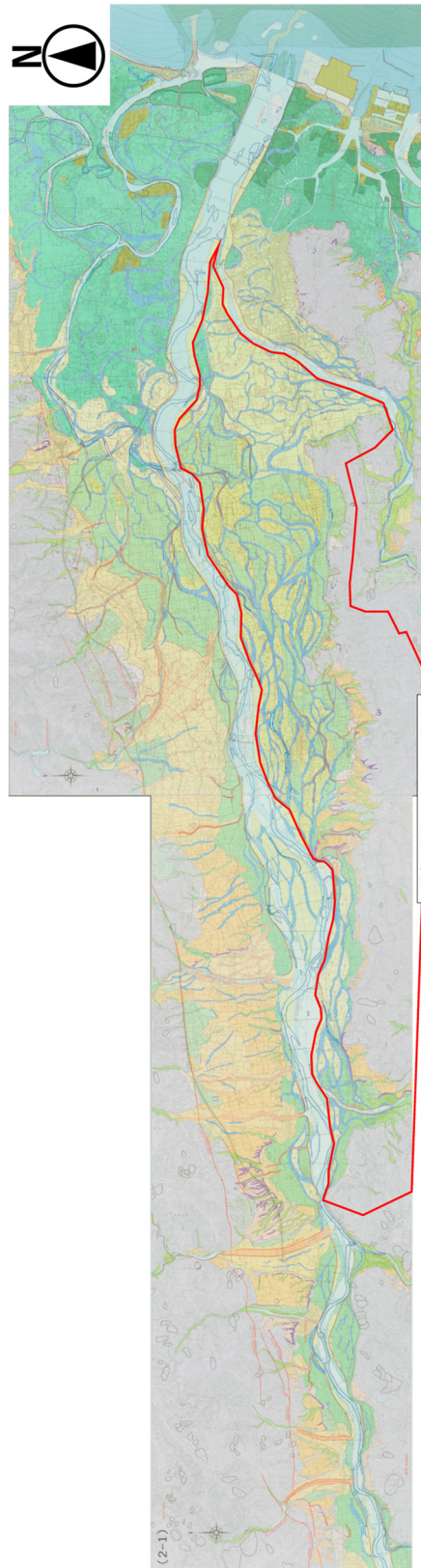


図 5-2 吉野川水系水害治水分類図(1995) ([86]を筆者編集)

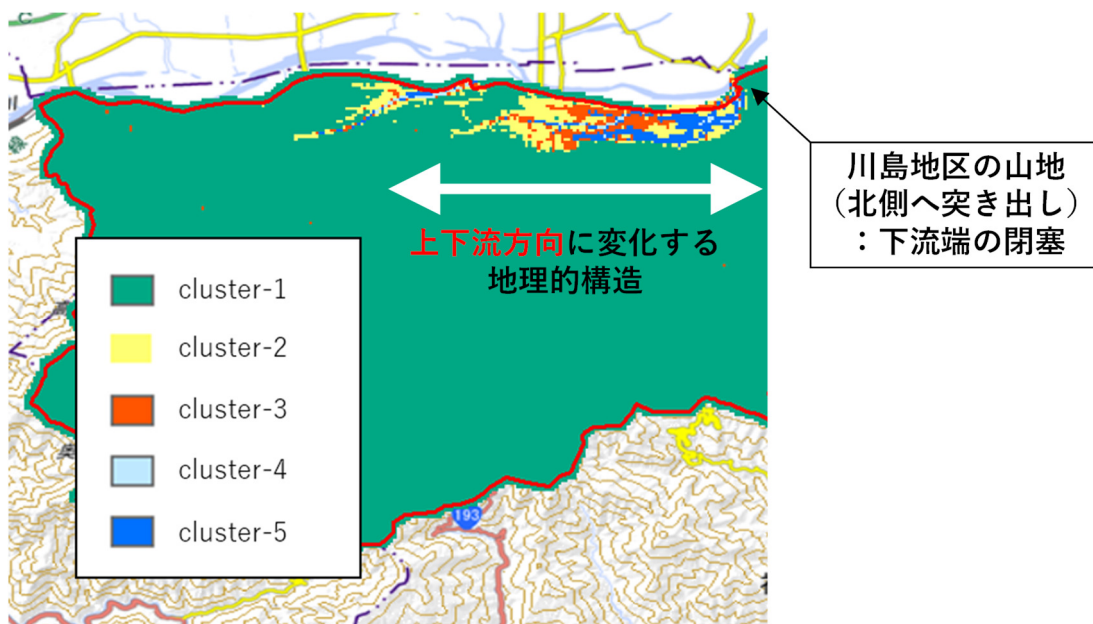


図 5-3 川島地区上流部の確率的ハザードの地理的構造

### 5-1-3. 蛇行原区間に着目した自然的要因

吉野川市川島地区より下流側の蛇行原区間においては、中央構造線に沿った本川の谷幅が上流と比べて広くなり、その一方で北側の阿讃山脈の標高が低くなるために左支川扇状地の規模が小さくなることから、川島地区より上流側で本川が受け続けてきた南側に追いやる移動圧力が小さくなる。その結果、本川が南側の山塊に押し付けられることがなくなり、本川河道が蛇行と流路変更を行うことができる蛇行原が生じた。この蛇行原においては、主に東西方向に走る旧流路網と低地の帯状氾濫原、それらに囲まれた自然堤防群が発達した。図 5-4 は水害地形分類図の蛇行原区間に関する拡大図であり、発達した旧河道網が読み取れる。

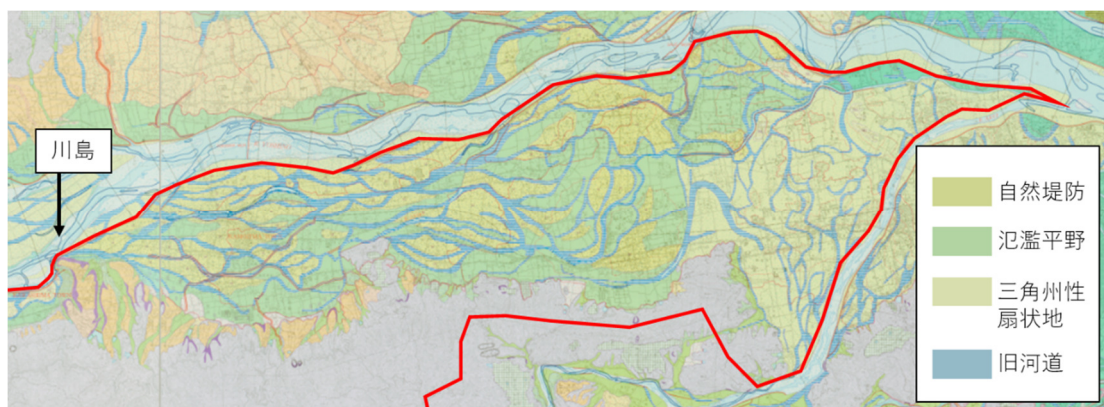


図 5-4 蛇行原区間の水害地形分類図拡大図 ([86]を筆者編集)



蛇行原の領域においては南側山塊により本川・支川の閉塞が生じないため、湛水型の浸水区画は生じづらい。旧河道のうち支川河道が走るものは支川の溢水型氾濫による帯状の浸水区画が形成され、本川と平行に同様な確率的ハザード・リスク特性を持つ領域が生じることとなる。支川河道が走らない旧河道に関して、特に集水域の広いものは内水浸水による帯状の浸水区画が形成されることで、本川と平行に同様な確率的リスク・ハザード特性を持つ領域が生じる。一方で自然堤防は周囲との比高差から確率的リスク・ハザード特性もまた周囲と異なる場合が多いが、各自然堤防の形状は本川上下流方向に細長い島状のものが多い。これらの自然的要因が、蛇行原を横断する方向に確率的リスク・ハザード特性が変化する横軸型のハザード・リスク構造が成立する条件となったと考えられる。

## 5-2. 社会的要因の分析

前節では自然的要因に着目し、地形地質の視点から谷底平野区間・蛇行原区間の確率的リスク・ハザード特性の成立に与えた影響を分析した。本節では、前節で指摘した地形地質的条件のもとで歴史的に展開した流域固有の社会的要因に着目した分析を行う。

### 5-2-1. 江戸期以前の吉野川流域

吉野川流域における江戸期以前の治水事業や築堤の記録はほとんど確認されない<sup>28</sup>。この理由としては第一に、吉野川の三好市池田より上流は先行性河川であり、山間部流路が長くなり本川出水時の水威が大きすぎたこと、第二に、三好市池田より下流は南北を山塊で挟まれた直線的な谷地形であり、築堤の結果として洪水から防御される新規用地の面積が小さいこと、が考えられる。特に第一の理由は、吉野川本川沿いで水田開発が行われなかった理由としても指摘されている[90]。

江戸期以前の吉野川本川の変流に関する記録としては、1098年（承徳2年）の大洪水による岩津狭窄部の開削が挙げられる。この洪水以前、吉野川本川は岩津狭窄部北岸の岩塊を北に回り込む河道を流れていたが、この洪水によって現在の岩津狭窄部の岩盤が削り取られて現在の河道に変流したと記録されている[91, 92]。これ以降、岩津狭窄部から吉野川市川島に向けて、南岸に押し付けられた本川が直線的に流れる流路が固定されたと考えられる。

吉野川市川島より下流の蛇行原区間に関しては、大きな流路変更の記録は残されていない。ただし、対象領域東側境界となっている右支川鮎喰川が形成した三角州性扇状地の上部にまで侵入した吉野川本川旧河道の存在が図 5-4 においても推測されており、吉野川本川は現在の右岸側蛇行原中心部、現在の右支川飯尾川河道付近を東流していた時期が存在したと考えられる。

<sup>28</sup> 細川勝元による搔寄堤（文明年間、1469-1487）のみが記録に残る。

### 5-2-2. 徳島藩の治水政策と農業政策

1585年に阿波国が蜂須賀氏所領となり、藩祖蜂須賀家政が徳島に入場した後の流域の概況は、複数の大絵図から読み取ることができる。現存する最も古い大絵図は1609年（慶長10）のものとして推定されており（図5-5）[93]、①現在の吉野川本川筋は別宮川という名で呼ばれ、現在の旧吉野川筋が本川であったこと、②右大支川の鮎喰川は吉野川へ合流せず独立した水系であったこと、が読み取れる。



図 5-5 1609年頃（慶長10年頃）阿波国大絵図[93]

徳島城および城下町は吉野川や別宮川ではなく鮎喰川とその派川によって取り囲まれた領域に広がっていたと推測されており、この位置関係は年代が下った1641年（寛永18年）の阿波国大絵図においてより顕著に描かれている（図5-6）[94]。この図においては、飯尾川は鮎喰川へと合流している。



図 5-6 1641年頃（寛永18年頃）阿波国大絵図[94]

徳島藩による徳島城下の治水対策として築堤等が行われたものは、上述の位置関係を踏まえ、主に鮎喰川を対象としたものであった[95, 96]。この理由として、当時の技術水準からして築堤等による治水対策を講じることができる規模を吉野川本川が越えていたことが指摘されているが[90]、鮎喰川自体で吉野川本川の氾濫水が徳島城下に到達することを食い止める戦略があったこともまた指摘されている[95, 96, 97]。鮎喰川は江戸時代初期には眉山に沿って徳島城下に直接流れ込んでいたが、江戸中期には徳島藩により河道を北に曲げられて別宮川と合流するような流路を取るようになった[95]。これもまた、鮎喰川自体で吉野川の氾濫水を食い止めるための策であったと考えられる。

ただし、鮎喰川の築堤は右岸のみに限られ、左岸に関しては無堤か、あるいは規模に劣る堤防のみが築堤された[87]。このため、もし吉野川本川が右岸側に大きく氾濫した場合、支川の飯尾川を通じて氾濫水が鮎喰川に負荷をかけ、徳島城下の安全を脅かす可能性があった。

1672年（寛文12年）、第四代徳島藩主の蜂須賀綱通により、吉野川の第十付近に別宮川が開削された<sup>29</sup>。この開削の理由は徳島城下の堀への給水および舟運であったと伝えられている。しかしながら、当時の吉野川本川筋、現在の旧吉野川筋の河床勾配に比べて、新たに開削された別宮川筋の河床勾配が大きかったことにより、別宮川は吉野川からの洪水流放水路のように機能し、数十年の間に別宮川は河岸侵食により拡幅して、当時の吉野川本川筋から水流を奪うようになった[97, 98]。別宮川は当時の吉野川本川より徳島城下に近く、また城下の水路と接続していたため、徳島藩には吉野川本川の洪水流に対処する必要性が生じた。

徳島藩が吉野川本川に対して採用した治水対策は大きく2通りに分けられる。第一は本川右岸側派川の江川・神宮入江川を遊水地化し、本川洪水流を別宮川上流で貯留すること[97]、第二は、吉野川本川と別宮川が分流する第十<sup>30</sup>付近に堤防や堰を設置すること[95]である。

第一の治水政策においては、江川と吉野川本川の分派点、神宮入江川と吉野川本川の分派点のそれぞれに越流堰を築き[87]<sup>31</sup>、堰を超える水位の洪水流が江川・神宮入江川に流入するようにするとともに、その河道を固定し、遊水地としての機能が失われないようにした。また、江川・神宮入江川の南側には自然堤防帯が発達しており、鴨島・牛島といった主要集落がその上部に発達していたため、その南の飯尾川流域の堤防として機能し、洪水流を北側に押し止めるとともに、飯尾川流域への流入水の勢いを減じる役割を果たしていたと考えられる。一方で自然堤防上の集落は浸水を免れないため、住民が徳島藩へ度々築堤の許可を

<sup>29</sup> 一方で、1672年以前の大絵図である図5-5・図5-6の中でも、すでに別宮川という河川が現在の吉野川本川とほぼ変わらない位置関係で描写されている。すなわち1672年の別宮川開削は、全くの新川の開削ではなく、既存の小河川の拡幅、あるいはすでに存在した別宮川と吉野川本川を連絡する水路の開削であった可能性もある。

<sup>30</sup> この第十とは地名である。現在の石井町第十に相当する。吉野川第十堰は第十という地区名から名付けられたものであり、吉野川の十番目の堰という意味ではない。

<sup>31</sup> 江川と吉野川本川の分派点は知恵島堰、神宮入江川と吉野川の分派点は八ヶ村堰である。現在は堤防に吸収され現存しない。

求めたが[99]、実際の築堤はほとんど行われなかった。実際に徳島藩においては、堤防の築堤は厳罰を処される禁であった[95]<sup>32</sup>。これには、徳島藩の藍作を主体とした農業政策も関係している。

徳島藩はその領地に吉野川・那賀川の大河川を2本抱え、洪水被害が大きく平野の少ない地形であることから、藍作を奨励していた。藍は一年草であり、台風による洪水期を迎える前の8月末から9月上旬にかけて収穫できるため、洪水の被害が小さく抑えられるからである。また、藍は連作を嫌う性質があるが、吉野川の氾濫により農地に客土がもたらされることによりこの問題も解決された。農業の視点からは、吉野川の氾濫は藍の生産に必要な要素の一つであった。氾濫水を完全に防がず、広く行き渡らせることもまた必要とされていたのである。すなわち、江川・神宮入江川の南側の自然堤防は、洪水流を本川・遊水地内部に押し止めるとともに、洪水客土をもたらず氾濫水を許容する越流堤としての機能のために、さらなる人工的な築堤は行われなかったと考えられる。

一方で、神宮入江川下流部においては、図5-7に示すように、神宮入江川・吉野川本川の双方が北側へと方向を変える。この区間の河道を安定させるためには、神宮入江川周囲の自然地形では不十分であるためか、例外的に徳島藩によって神宮堤・竜王堤の築堤が行われている。第十堰は1752年に築造され、その主目的は別宮川が吉野川本流の水流を奪ったことによる吉野川本流の水位減少と塩水遡上による塩害への対策とされる[97]。しかし、第十堰と神宮堤・竜王堤の築造が一举に行われた可能性が指摘されており[95]、また図5-7の右下に、別宮川へ合流する鮎喰川へと合流する飯尾川が、神宮入江川と神宮堤・竜王堤と隣接して描かれていることを考えると、第十堰は神宮堤・竜王堤と一体となって別宮川・飯尾川方面への吉野川本川の洪水流の侵入を防ぐための治水機能も併せ持っていたのではないかと考えられる。この神宮堤・竜王堤は、神宮入江川分派点の南側の高畑地区が乗っている自然堤防帯に接続する形で途切れており、神宮入江川が遊水地としての機能を果たすための堤防を構築していると考えられる。一方で、第十堰は締切堤ではなく越流堤の構造であったとも考えられており、一定規模以上の洪水では流量の一部を別宮川に負担させる構造になっていた[97]。

上述の通り、別宮川開削以降の徳島藩による治水政策は、①本川右派川の遊水地化による本川洪水流の緩和、②第十堰付近での本川の北流の固定による本川洪水流の別宮川への直接流入の阻止、③吉野川本川・遊水地群と飯尾川・鮎喰川流域の分離、に焦点が置かれていたと考えられる。一方で、藍作のために中小洪水での浸水と客土を歓迎する無堤政策により、③は自然堤防を主体とした微高地によって担われ、人工堤防は第十堰付近のごく一部のみとなった。これらの政策がどの程度有効であったのかは検証を要するが、江戸時代を通じて、吉野川本川の洪水流は別宮川を通じて徳島城下に大被害をもたらすことはなかったとされている[97]。

---

<sup>32</sup> 藩士の稲垣監物は1753年、藩命に背いて牛島地区岸之上に築堤（修築）を行ったのち自害したと伝えられている[99, 100]。



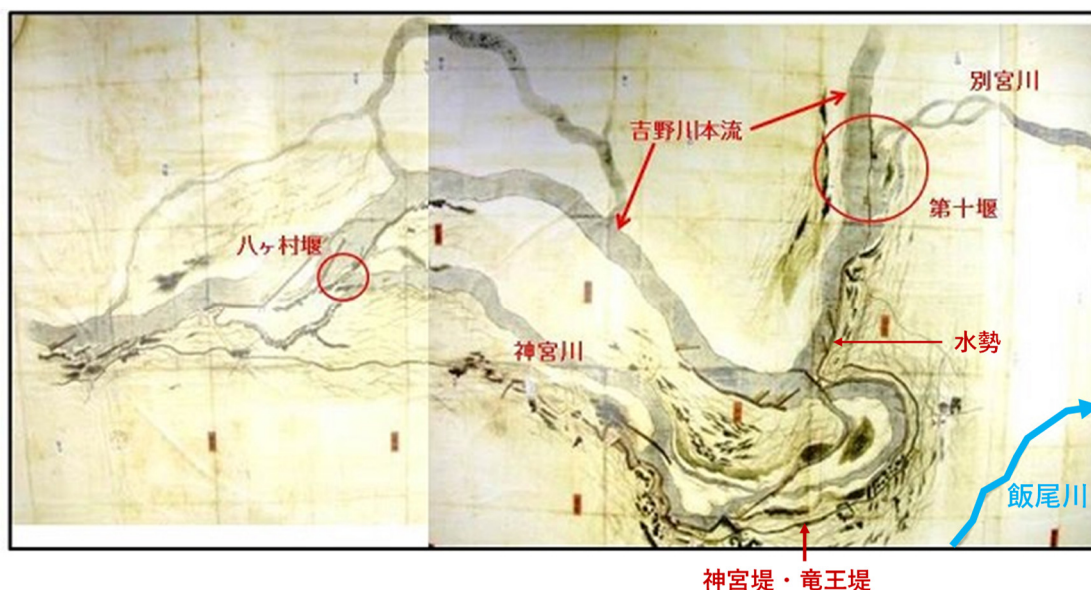


図 5-7 神宮入江川合流点付近 ([101, 102]を筆者編集)

### 5-2-3. 明治期の連続堤防化

吉野川中下流部の治水における江戸期と明治期の最大の違いは、連続堤防を主体とした氾濫対策の導入である。図 5-8 に、明治初頭（1875 年・明治 8 年以前）にすでに築堤されていた対象領域の堤防を黒で、派川分派点の堰を紅で示す[103]。細切れの堤防がいくつか存在するのみである。



図 5-8 明治初頭にすでに建設されていた堤防 ([103]をもとに筆者作成)

吉野川中下流部における連続堤防の築堤開始は明治8年着工の川島・藍畑間であり、江川右岸側を通る堤防法線で築堤された。このとき、神宮入江川の分派点に築造された八ヶ村堰は堤防中に埋没し、神宮入江川は支川化した[103]。すなわち、神宮入江川の遊水地としての機能を減じる方針を取った。一方で、河道浚渫や拡幅等、本川通水能を高める事業はこのとき取られなかったため、治水水準は低下したと考えられる。特に、八ヶ村堰の締切により、八ヶ村堰上流部の江川右岸の堤防や、八ヶ村堰下流の本川堤防が危険にさらされることを懸念し、周辺住民が名東県を訴える自体も生じた[104]<sup>33</sup>。果たしてこの懸念どおり、分派点閉鎖後の明治21年7月の出水では八ヶ村堰埋立地点直下流の本川右岸堤防が破堤し、西覚円村（現石井町藍畑西覚円）を壊滅させる被害を生じている（覚円騒動）[104, 105]<sup>34</sup>。



図 5-9 明治8年に計画された川島・藍畑間の連続堤防

覚円騒動による中断を挟みつつも、旧河川法が制定された明治29年までには、に示す連続堤防が築堤された[87, 106, 107, 108]。ここで着目すべきは、①知恵島堰を埋め立てる形で江川と本川の間に連続堤防が築堤されていること、②上流を締め切った神宮入江川の南側にも連続堤防が築堤のされていること、である。①から、江川流域についてもその遊水地としての機能を放棄したことが理解される。一方で、②の意図は不明であるが、神宮入江川の旧遊水地領域が更に南部の飯尾川流域から独立した性質を持つこととなる。

<sup>33</sup> 原告は石井村他八村であり訴訟の主な論点は①八ヶ村堰締切による上流堤防の安全性の懸念、②八ヶ村堰と知恵島堰の締切の順序、③地元負担金、であった[104]。

<sup>34</sup> 覚円騒動は洪水被害の補償のみを巡る混乱ではなく、西覚円・東覚円の北部に築堤されていた本川堤防を、本川の通水能向上のために南方に引堤するという明治19年の計画を巡る請願騒動でもある[105]。明治21年の洪水により引堤計画は頓挫し、当時の西覚円・東覚円北側の本川堤防が現在の堤防法線に引き継がれた。





図 5-10 明治 29 年までに築堤された堤防

その後も堤防の整備は続き、1907 年（明治 40 年）には旧河川法に基づく第一期改修工事が着手され、1927 年（昭和 2 年）には図 5-11 に示す堤防が完成した[103]。この時点での堤防法線はほぼ現在の堤防法線と同一である。第一期改修工事には計画高水流量 13980m<sup>3</sup>/s を安全に流下させる河道として別宮川を吉野川本流に変更し、第十から北流する以前の本流は旧吉野川として洪水を負担させないというものであった。すでにその計画において江川・神宮入江川の遊水地については触れられていない。また、時期は不明であるが、第十堰上流側の滯筋は直線化され、別宮川へまっすぐに洪水流が流入するような現在の河道形状となった。したがって、江川・神宮入江川の旧遊水地区画は、図 5-12 に示すように、完全に堤内地と見なされるに至ったと考えられる。



図 5-11 昭和 2 年の第一期改修工事竣工時の堤防



図 5-12 江川・神宮入江川の旧遊水地の堤内地化

明治期に連続堤防化が進められた理由の一つとして、藍作の衰退も挙げられる。藍の作付面積は明治 30 年代中期に約 15000ha で最大となった一方、1880 年頃からドイツで開発された合成染料インディゴに市場を奪われ、以降生産量は急速に低下する[109]。藍作のための畑地は急速に桑畑へと置換され、大正 7 年の旧版地形図においては従来の藍畑は一面の桑畑へと変貌している。藍作農地を維持するために洪水客土を迎え入れ続ける必要性がなくなったことが、連続堤防化が受け入れられた産業的側面から見た理由であると考えられる。

#### 5-2-4. 蛇行原区間に着目した社会的要因のまとめ

吉野川市川島より下流側の蛇行原区間について、前節で述べた自然的要因を下敷きに、確率的リスク・ハザード特性を成立させた要因を検討する。

谷幅の拡大と北岸扇状地の縮小による蛇行原自体の幅の増大により、この区間では本川と平行した本川旧流路網と低地の帯状氾濫原、それらに囲まれた自然堤防群が発達した。に、蛇行原区間の確率的リスク・ハザード特性の地理的構造の大まかな区分を示す。①から④の各区分は、その内部において地理的構造を成立させる自然的・社会的要因が同一であるように分けたものである。



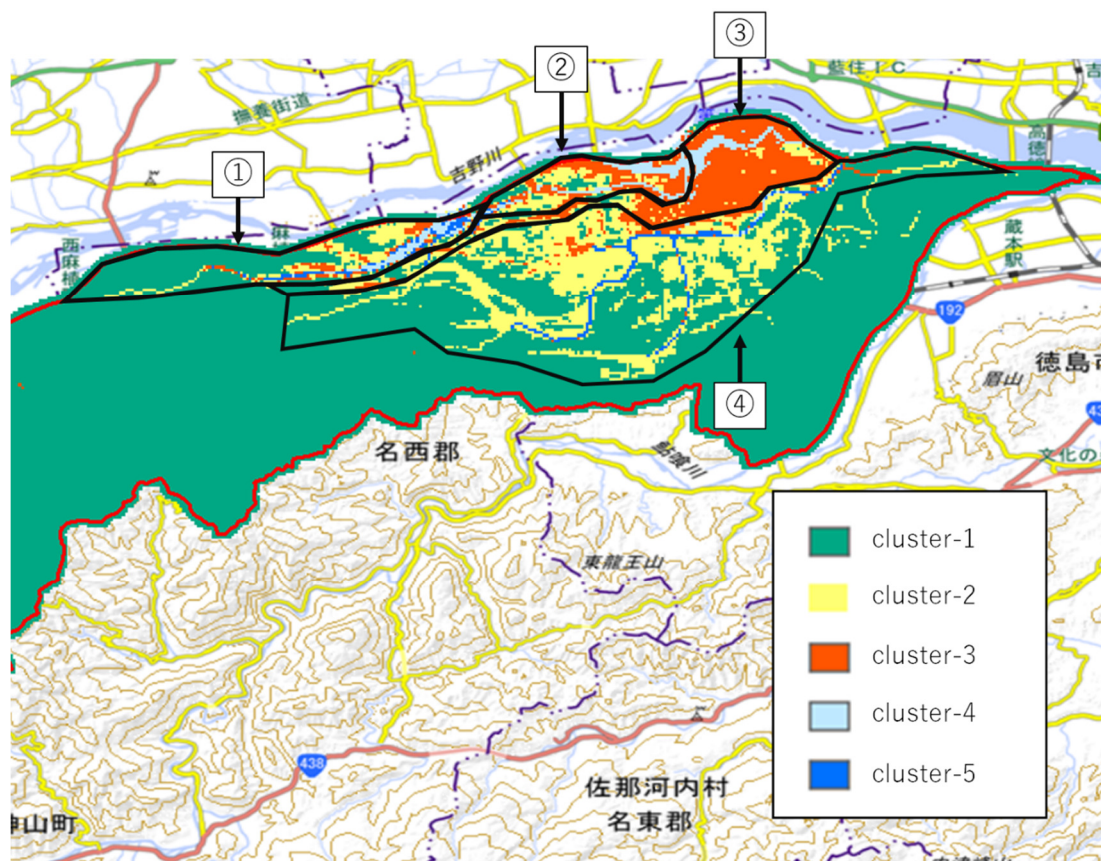


図 5-13 蛇行原区間の地理的構造のおおまかな区分

区分①は、支川である江川の集水域と対応し、明治期以降の築堤により堤内地化した領域である。江川は江戸期、特に別宮川開削以降、本川派川でありつつ、自然堤防に囲まれた河道沿いの領域を遊水地として利用されてきた。明治期以降は、領域南側・東側、ついで北側を連続堤防によって分断された。この領域では、江川河道および河道沿いの低地が水色のクラスタ4および濃い青のクラスタ5に分類され、東西の帯状の構造を作っている。また、区分②もまた支川である神宮入江川の集水域と対応し、明治期以降の築堤により堤内地化した領域である。神宮入江川も江川と同様に、江戸期、特に別宮川開削以降は、本川派川でありつつ、南西を自然堤防、南東および東部を局所的な人工堤防により囲まれた河道沿いの遊水地としても利用されてきた。この領域では、図 5-7 に示された本川河道跡が堤内地化され、微高地に囲まれて帯状の構造を示している（クラスタ4の水色領域）。また、南東側の境界沿いには、神宮入江川の河道沿いの頻繁な浸水域が線状の構造を示している（クラスタ4の水色領域）。

区分③は江川・神宮入江川の旧遊水地を取り囲む自然堤防・微高地領域であり、吉野川本川・江川・神宮入江川の流域と飯尾川の流域の境界領域にあたる。特に領域東側の島状部分は、北川を本川河道、南側を飯尾川河道によって挟まれた領域であり、南北の帯状の河道および河道沿い低地に比べて比高が高い。図 5-14 に標高別彩色図を示す。神宮堤・竜王堤の東側に、吉野川本川と飯尾川に挟まれた標高が高い領域が存在することが読み取れる。また、

神宮堤・竜王堤が西側の自然堤防に接続し、吉野川本川・神宮入江川流域と飯尾川流域を分離していることが読み取れる。区分③の領域は神宮堤・竜王堤を東側領域と、神宮堤・竜王堤の南側から西に向けて比高の高い自然堤防が帯状に区分①の南側を続いている領域である。この区分では、比較的ハザードの小さい緑色（クラスタ1）・橙色（クラスタ3）の島が連なっている。

区分④は区分③の南側であり、飯尾川流域に該当する。この領域内では、東西に伸びる飯尾川の河道沿いが濃い青（クラスタ5）、その周辺の低地が黄色（クラスタ3）、東西に長い自然堤防の島が緑（クラスタ1）と、南北方向に確率的リスク・ハザード特性が移り変わる地理的構造を示している。この区分の領域では、人為による社会的要因に基づく地理的構造の変化は小さいと考えられる。

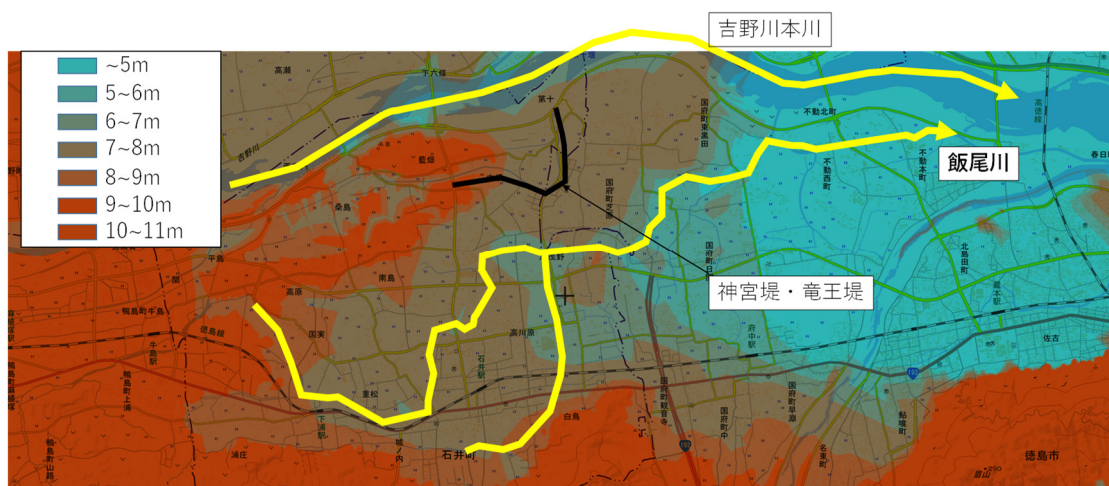


図 5-14 神宮堤・竜王堤付近標高段彩図

### 5-2-5. 谷底平野区間に着目した社会的要因のまとめ

前項で考察した蛇行原区間とは対照的に、吉野川市川島より上流側の谷底平野区間については、歴史的資料が下流側と比して少ないため、前節で述べた自然的要因との関係を述べるに留める。

南部山塊に押し付けられた本川と南部山塊の突起部により形成される下流端が閉塞した氾濫原は、明治期以降の連続堤防化により本川と厳密に切り離され、また本川・支川合流部に水門が設置されることにより本川からの逆流や背水効果が解消されたと考えられる。一方で、水門の閉塞による支川自体の湛水型氾濫が生じるため、谷底平野区間での確率的リスク・ハザード特性の地理的構造は、連続堤防化の前後で大きく変化しないと考えられる。

### 5-3. 本章のまとめ

本章では、吉野川流域中流部を対象とした事例分析から、谷底平野区間と蛇行原区間のそれぞれについて、確率的リスク・ハザード構造を成立させる自然的・社会的要因を検討した。要点を以下に述べる。

吉野川水系中下流域は中央構造線に沿って東西に延びる直線的な谷底平野が特徴的であり、その左右岸で地質が異なる。北岸（左岸）の山塊は和泉層群主体の阿讃山地であり、その活発な土砂生産により左岸側支川群は急勾配の土石流型扇状地を形成する。一方で南岸（右岸）の山塊は付加体の三波川変成帯主体の剣山地であり、地回り帯である一方で土砂生産量は少なく、右岸側支川群は扇状地を形成することなく本川谷底平野に流れ出る。

吉野川市川島町上流の谷底平野区間においては、谷幅が未だ狭く、一方で北岸の阿讃山地の標高が高く支川扇状地が大きいため、吉野川本川の河道は南岸側へ押し出される。一方で南岸の支川は扇状地を形成しないため、本川河道が南側山塊や山塊と接続した段丘へと押し付けられ、その上流部には下流側が閉塞した氾濫原が形成される。この氾濫原内部を支川が本川と並行して流れ、最下流部で閉塞を形成する山塊により行く手を阻まれて本川へと合流することにより、頻繁な湛水区域が氾濫原最下流部に形成され、そこからの距離によってリスク・ハザードが変化する状況が生じた。明治期以降の連続堤防化によってもその傾向は変わらず、谷底平野区間では上下流の方向に軸を持った確率的リスク・ハザード特性の変化軸が形成された。

吉野川市川島町下流の蛇行原区間においては、谷幅が拡大し、一方で北岸の阿讃山地の標高が低くなり支川扇状地が小さくなるため、吉野川本川の河道が南岸側へと押し出されることがない。したがって、谷底平野区間のように下流端が閉塞した氾濫原が形成されることはなく、度重なる流路の変化による並行的な支川・旧河道群とそれに沿った帯状の低地、それらの間の島状の自然堤防が発達した。帯状の低地は支川溢水による帯状の氾濫地帯となり、一方で自然堤防上には集落が展開した。特に発達した旧流路として、現在の飯尾川が挙げられる。江戸時代には阿波藩による無堤政策が敷かれたが、これは藍作第一主義による洪水客土を得る目的に加えて、蛇行原区間の派川を遊水地化することにより下流部への洪水流を抑える目的もあったと考えられる。特に別宮川開削後は、徳島城下への洪水流被害を抑える目的で、右派川の江川・神宮入江川の遊水地化と、現在の第十付近の神宮堤・竜王堤の築堤による本川の北向き流路の固定が行われ、本川洪水流の飯尾川・別宮川方面へ流下阻止が図られた。明治期に入ると、当初は江川右岸側に連続堤防が築堤されるが、次第に現在の堤防法線上に新堤防が築堤され、また別宮川が吉野川本川として扱われるようになり、現在の河道が確定した。江川・神宮入江川は本川堤内の支川となり、従来の遊水地域は頻繁な帯状浸水域となった。その周囲を、神宮堤・竜王堤と接続した微高

地・自然堤防帯が取り囲み、島状・帯状の低リスク・ハザード域を形成する。南部には飯尾川沿いの低地が帯状の溢水型浸水域を形成し、一部では自然堤防が島状の低リスク・ハザード域となり、蛇行原区間全体としては、横断方向を軸とした確率的リスク・ハザード構造が成立した。

上述の事例分析により、流域内部の確率的リスク・ハザード構造は、以下のような様々なスケールの要因により決定することが示唆された。

- ① 流域スケールの地質分布・土砂生産・中地形分布
- ② 河川地形・微地形
- ③ 歴史的河道変遷・河道変更
- ④ 歴史的築堤順序・堤内地化の経緯
- ⑤ 堤内地間の治水上の優先順位

特に、歴史的に治水上の役割を果たしてきた堤外地や支川・派川を明治期以降の連続堤防主義的な築堤によって堤内地化した場合、その領域の確率的リスク・ハザード構造がどのように保存・変化しているかを十分に検討する必要性が明らかになった。

今回の検討対象領域である谷底平野区間・蛇行原区間は、治水経済評価マニュアル（仮）の氾濫ブロック分割基準に従った場合、どちらも1氾濫ブロックから2氾濫ブロックに単純化され、氾濫ブロックごとに1本の水害リスクカーブしか算出されない。しかしながら、各氾濫ブロックの内部には、本章で明らかにしたように、流域の自然的・社会的要因に基づいた確率的リスク・ハザード特性の地理的構造が存在する。これらの地理的構造の特徴を理解した上で、各地先の確率的リスク・ハザード情報を都市計画・用地計画等へ活用していくことが望まれる。

また、現在まで地理学等の分野で行われてきた、地形地質等自然的要因と歴史的発展等社会的要因に基づく定性的な流域内のリスク分析について、本研究第4章で提示した地先スケールの確率的リスクカーブ・確率的ハザードカーブを用いた流域の地理的構造化による分析が有用であると考えられる。



## 第6章 本研究のまとめ

本研究の目的を再掲する。

- I. 面的な水害リスクカーブの領域間比較を通じた、水害の確率的リスク特性の地域性の検討
- II. 地先の水害リスクカーブとして表される確率的リスク特性に基づく、水害リスクの地理的構造としての把握手法の提案
- III. 水害リスクの地理的構造を成立させる自然的・社会的要因の分析

それぞれの目的に対応する、本研究の成果は以下の通りである。

- I. 水害の確率的リスク特性の多様性と地域性の検討【第2章・第3章】
  - 一級水系を対象とした回帰的手法による確率的リスク特性の分析から、我が国の一級水系は再帰期間ごとの寄与率に関して確率的特性が多様であることを定量的に初めて示した。また、各類型に属する一級水系の地理的分布には偏りがあり、地方スケールの地形地質・気候条件が影響を与えている可能性を指摘した。(第2章)
  - 基礎自治体を対象とした回帰的手法による確率的リスク特性の分析のため、災害が発生しない年の存在を考慮できる改良FD法を開発・検証した。また、改良FD法に基づく基礎自治体ごとの確率的リスク特性を算出・検討し、市区町村ごとに再帰期間ごとの寄与率に関して確率的特性が多様であることを定量的に初めて示した。(第3章)。
- II. 地先の水害リスク・ハザード特性を用いた領域構造化手法の提案【第4章】
  - 大量の水害リスクカーブ・水害ハザードカーブについて、その確率的特性を表す形状の類似度に基づいて分析評価を行う手法は開発されていなかったため、「再帰期間ごとのリスク寄与率に基づく類型化」・「カーブのベクトル化によるクラスタリング」の2手法を提案し、それぞれの利点・欠点を示した。
  - 氾濫アンサンブル計算によって算出した30mグリッドセルごとの水害リスクカーブおよび水害ハザードカーブを用いて、確率的特性の類似度に基づいて領域を確率的リスク・ハザード特性の地理的構造として可視化した。既存の水害ハザードマップはとある年超過確率に対する最大浸水深の地理的分布であり、その他の年超過確率に関する情報を喪失している。一方で領域全体の面的なリスクカーブは、領域内部の地理的分布情報を喪失している。地理的分布情報と確率的情報の双方を喪失せずに流域を構造化する手法および試みは本研究が初めてである。
  - 谷底平野区間と蛇行原区間とでは、異なる確率的リスク・ハザード特性の地理的構造が抽出された。谷底平野区間では上流から下流に向けて縦断的に確率的リスク・

ハザード特性が移り変わる一方で、蛇行原区間では蛇行原を横断する方向に確率的リスク・ハザード特性が移り変わる地理的構造が抽出された。

### III. 水害リスク・ハザード特性の地理的構造の自然的・社会的要因の分析【第5章】

- 谷底平野区間・蛇行原区間のそれぞれで見られた確率的リスク特性の特徴的な地理的構造について、その自然的・社会的要因を分析した結果、以下のような様々なスケールの要因を指摘した。
  - 流域全体の地質分布・土砂生産・中地形分布
  - 河川地形・微地形
  - 歴史的河道変遷・河道変更
  - 歴史的築堤順序・堤内地化の経緯
  - 堤内地間の治水上の優先順位
- 歴史的に治水上の役割を果たしてきた堤外地や支川・派川を明治期以降の連続堤防主義的な築堤によって堤内地化した場合、その領域の確率的リスク・ハザード構造がどのように保存・変化しているかを十分に検討する必要性を指摘した。
- 都市計画・土地利用規制等のための基本的情報として、確率的リスク・ハザード特性の地理的構造が活用可能であることを指摘した。

上述の成果を踏まえた、本研究の意義及び展望を述べる。

面的な確率的リスクの活用に関して、我が国において治水事業の計画・実施や効果評価は水位の流域を単位として行われてきた。これら計画の検討段階において、目標となる治水水準は流域雨量や本川流量など災害外力の確率的評価により決定される一方で、確率的リスク情報については計画の経済的妥当性の裏付けのためにのみ用いられ、目標治水水準自体の妥当性検証には用いられてこなかった。本研究が明らかにした一級水系スケールでの確率的リスク特性の多様性に関する知見は、本川流量の年超過確率主義においては考慮されていない、流域ごとのリスクバランスの検討や、日本全国での治水関連予算の配分の検討の必要性を示唆するものである。また、総合治水計画など流域全体の流出・氾濫抑制に関する治水事業に対して、定量的な評価軸を導入する際の基本的な情報となると考える。また、基礎自治体スケールでの確率的リスク情報は、市区町村ごとにリスク対策を最適化するため活用可能であるだろう。

点的な地先の確率的リスク・ハザードの活用に関して、これらは地先の対策の最適化のために不可欠な情報である。本研究の着眼点である地理的構造に着目する以前に、各地先での確率的リスク・ハザードを流域住民・河川管理者・防災責任者が把握することが重要である。ただし、地先の対策を個々のアクターが散発的に実行する前段階として、ある程度の地理的広がりを持った領域に対する都市計画・土地利用等の施策を行い、流域全体のリスク構造をより適切な方向に誘導するためには、やはり確率的リスク・ハザード特性に基づいた流域の地理的構造の可視化が必要であろう。本研究第4章で検討した手法は探索的な手法であり、特にクラスタリング手法は、地理的構造の「単一の正解」ではなく「複数の可能な地理的構

造化」を得ることができる。計画・政策のスケールに合った地理的構造化を各ケースで使い分ける必要がある。さらに、本研究第5章で検討したとおり、可視化される地理的構造の背後には様々なスケールの自然的・社会的要因が存在する。リスク低減の最適策を闇雲に追求するのではなく、確率的リスク・ハザード特性の地理的構造とその各種要因を総合して、領域全体として受け入れ可能な水害マネジメントの方針を検討することが望ましい。

本研究の知見は、面的および点的な確率的リスク情報双方の活用可能性を示すものであるとともに、面的リスク情報の背後にあつて見落とされてきた点的リスク情報への着目を促すものであり、河川計画・治水政策上きわめて有効なものであると考えられる。

□



## 参考文献

### 【論文全体】

以下の図面は、国土地理院の電子地形図（タイル）を背景として使用している。国土地理院コンテンツ利用規約「出所の明示」に従い、ここにまとめて明示する。

➤ 図 4-6 (p.70), 図 4-7 (p.70), 図 4-12 (p.78), 図 4-13 (p.78), 図 4-14 (p.79), 図 4-15 (p.79), 図 4-25 (p.86), 図 4-39 (p.102), 図 4-41 (p.103), 図 4-42 (p.105), 図 4-43 (p.105), 図 4-45 (p.109), 図 4-46 (p.109), 図 4-47 (p.109), 図 4-48 (p.110), 図 4-49 (p.110), 図 4-50 (p.110), 図 4-51 (p.112), 図 4-52 (p.112), 図 4-53 (p.112), 図 4-54 (p.113), 図 4-55 (p.113), 図 4-56 (p.113), 図 4-57 (p.115), 図 4-58 (p.115), 図 4-59 (p.117), 図 4-60 (p.117), 図 5-3 (p.124), 図 5-8 (p.129), 図 5-9 (p.130), 図 5-10 (p.131), 図 5-11 (p.131), 図 5-12 (p.132), 図 5-13 (p.133), 図 5-14 (p.134)

### 【初出順】

- [1] 国土交通省水管理・国土保全局：河川砂防技術基準調査編。2011.
- [2] Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S., Kim, H. and Kanae, S.: Global flood risk under climate change. *Nature climate change*, Vol.3, pp.816–821, 2013.
- [3] 気候変動による水害研究会：激甚化する水害～地球温暖化の脅威に挑む～. 日経 BP 社, 2018.
- [4] 丹保憲仁：人口減少下の社会資本整備—拡大から縮小への処方箋. 土木学会, 2002.
- [5] 宇都正哲, 北詰恵一, 浅見泰司, 植村哲士：人口減少下のインフラ整備. 東京大学出版会, 2013.
- [6] 国土交通省社会資本整備審議会河川分科会気候変動に適応した治水対策検討小委員会：水災害分野における気候変動適応策のあり方について. 2015.
- [7] de Moel, H., Bouwer, L. M. and Aerts, J. C. J. H.: Uncertainty and sensitivity of flood risk calculations for a dike ring in the south of the Netherlands. *Science of the Total Environment*, Vol.473, pp.224–234, 2014.
- [8] 中村晋一郎：基本高水の制度化に関する歴史研究. 東京大学博士論文乙第 17991 号, 2014.

- [9] 中村晋一郎, 沖大幹: 我国における基本高水改訂要因の変遷とその特徴. 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.67, No.4, pp.I\_685–I\_690, 2011.
- [10] Nakamura, S. and Oki, T.: Paradigm Shifts on Flood Risk Management in Japan: Detecting Triggers of Design Flood Revisions in the Modern Era. *Water Resources Research* Vol.54, No.8, pp.5504–5515, 2018.
- [11]: 国土交通省: 河川砂防技術基準計画編. 平成 16 年.
- [12] 国土交通省: 治水経済評価マニュアル(案), 平成 17 年.
- [13] 田中一輝: 全国初の水害リスク評価を踏まえた鈴鹿川水系河川整備計画について. 平成 29 年度中部地方整備局管内事業研究発表会, イノベーション部門, 論文番号 14, 2017.
- [14] 国土交通省中部地方整備局: 鈴鹿川における河川整備の効果について (水害リスクの評価 (試行)). 第 16 回三重河川流域委員会, 配布資料 8, 2016.
- [15] 国土交通省中部地方整備局: 報告に係る資料【河川事業】. 第 17 回三重河川流域委員会, 配布資料 7-2, 2016.
- [16] 藤見俊夫, 柿本竜治, 山田文彦, 廣瀬健康: 治水整備による水害リスクカーブの変遷に関する研究. 土木計画学研究・論文集, Vol.27, No.1, pp.65–70, 2010.
- [17] 田中智大, 立川康人, 市川温, 萬和明: 降雨継続時間に対する総降雨量の条件付き確率分布を用いた水害リスクカーブの作成. 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.72, No.4, pp.I\_1219–I\_1224, 2016.
- [18] 国土交通省: 大野川水系河川整備計画評価資料.  
URL:[http://www.mlit.go.jp/tec/hyouka/public/jghks/karute/img/14230689011/14230689011\\_2.pdf](http://www.mlit.go.jp/tec/hyouka/public/jghks/karute/img/14230689011/14230689011_2.pdf) (最終閲覧 2019/01/05)
- [19] 谷端郷: 近代日本の年における水害被災地域の研究—1930 年代の京都市・大阪市・神戸市を事例として—. 立命館大学大学院博士論文, 2015.
- [20] Gumbel, E. J.: The Return Period of Flood Flows. *The Annals of Mathematical Statistics*, Vol.12, No.2, pp.163–190, 1941.



- [21] White, G.F.: Human Adjustment to Floods. *The University of Chicago Department of Geography Research Paper*, No.29, 1945.
- [22] 高橋裕：洪水論．東京大学博士論文乙第 449 号，1964.
- [23] Mostert, E. and Junier, S. J.: The European flood risk directive: challenges for research. *Hydrology and Earth System Sciences Discussion*, Vol.6, pp.4961–4988, 2009.
- [24] Büchele, B., Kreibich, H., Kron, A., Thielen, A., Ihringer, J., Oberle, P., Merz, B. and Nestmann, F.: Flood-risk mapping: contributions towards an enhanced assessment of extreme events and associated risks. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol.6, No.4, pp.485–503, 2006.
- [25] Meyer, V., Haase, D. and Scheuer, S.: Flood risk assessment in European River Basins: concept, methods, and challenges exemplified at the Mulde River. *Integrated Environmental Assessment and Management*, Vol.5, No.1, pp.17–26, 2009.
- [26] Kaplan, S. and Garrick, B. J.: On the quantitative definition of risk. *Risk Analysis*, Vol.1, No.1, pp.11–27, 1981.
- [27] Apel, H., Thielen, A. H., Merz, B. and Blöschl, G.: A probabilistic modelling system for assessing flood risks. *Natural Hazards*, Vol.38, pp.79–100, 2006.
- [28] de Moel, H., Jongman, B., Kreibich, H., Merz, B., Penning-Rowsell, E. and Ward P. J.: Flood risk assessments at different spatial scales. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, Vol.20, No.6, pp.865–890, 2015.
- [29] Merz, B. and Thielen, A. H.: Flood risk analysis: concepts and challenges. *Österreichische Wasser und Abfallwirtschaft*, Vol.56, No.3–4, pp.27–34, 2004.
- [30] 柿本竜治, 山田文彦, 藤見俊夫: 水害危険地域への土地利用規制導入効果検証への水害リスクカーブの適用. 都市計画論文集, Vol.47, No.3, pp.901–906, 2012.
- [31] 田中智大, 市川温, 萬和明, 立川康人: 浸水被害確率マップ作成手法の開発と宅地かさ上げによる便益評価への応用. 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.74, No.4, pp.I\_1477–I\_1482, 2018.

- [32] de Moel, H., Bouwer, L. M. and Aerts, J. C. J. H.: Uncertainty and sensitivity of flood risk calculations for a dike ring in the south of the Netherlands. *Science of the Total Environment*, Vol.473, pp.224–234, 2014.
- [33] 田中智大, 立川康人, 萬和明: 分布型流出モデルをネスティングする流出・氾濫一体型モデルの構築. 土木学会論文集 B1 (水工学), 70 巻, 4 号, pp.I\_1495–I\_1500, 2014.
- [34] 平野淳平, 大楽浩司: 東京都試験における水害リスク評価手法の開発. 防災科学技術研究所研究報告, 第 80 号, 2013.
- [35] 大楽浩司, 平野淳平: 東京都市圏における水害リスク評価手法の開発. 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.69, No.4, pp.I\_1555–I\_1560, 2013.
- [36] 大楽浩司, 山形与志樹, 平野淳平, 瀬谷創: 東京都市圏の水災害リスクと不動産への影響. 日本不動産学会誌, Vol.29, No.1, pp.40–45, 2015.
- [37] Merz, B. and Thielen, A. H.: Flood risk curves and uncertainty bounds. *Natural Hazards*, Vol.51, No.3, pp.437–458, 2009.
- [38] Apel, H., Merz, B. and Thielen, A. H.: Quantification of uncertainties in flood risk assessments. *International Journal of River Basin Management*, Vol.6, No.2, pp.149–162, 2008.
- [39] de Moel, H. and Aerts, J. C. J. H.: Effect of uncertainty in land use, damage models and inundation depth on flood damage estimates. *Natural Hazards*, Vol.58, No.1, pp.407–425, 2011.
- [40] Apel, H., Thielen, A. H., Merz, B. and Blöschl G.: Flood risk assessment and associated uncertainty. *Natural Hazards and Earth System Science*, Vol.4, No.2, pp.295–308, 2004.
- [41] de Moel, H., Bouwer, L. M. and Aerts, J. C. J. H.: Uncertainty and sensitivity of flood risk calculations for a dike ring in the south of the Netherlands. *Science of the Total Environment*, Vol.473, pp.224–234, 2014.
- [42] Arnell, N. W. and Gosling, S. N.: The impacts of climate change on river flood risk at the global scale. *Climatic Change*, Vol.134, No.3, pp.387–401, 2016.

- [43] Alfieri, L., Bisselink, B., Dottori, F., Naumann, G., Roo, A., Salamon, P., Wyser, K. and Feyen, L.: Global projections of river flood risk in a warmer world. *Earth's Future*, Vol.5, pp. 171–182, 2017.
- [44] Oudin, L., Andréassian, V., Perrin, C., Michel, C. and Le Moine, N.: Spatial proximity, physical similarity, regression and ungaged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments. *Water Resource Research*, Vol.44, No.3, 2008.
- [45] 巖島怜, 田中亘, 島谷幸宏: 全国 46 地点を対象とした流域特性が洪水流量に及ぼす影響に関する研究. 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.72, No.4, pp.I\_1255–I\_1260, 2016.
- [46] Thieken, A. H., Müller, M., Kleist, L., Seifert, I., Borst, D. and Werner, U.: Regionalisation of asset values for risk analyses. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol.6, pp.167–178, 2006.
- [47] Ernst, J., Dewals, B. J., Detrembleur, S., Archambeau, P., Erpicum, S. and Pirotton, M.: Micro-scale flood risk analysis based on detailed 2D hydraulic modelling and high resolution geographic data: *Natural Hazards*, Vol.55, No.2, pp. 181–209, 2010.
- [48] Wang, Z., Wu, J., Cheng, L., Liu, K. and Wei, Y.: Regional flood risk assessment via coupled fuzzy c-means clustering methods: an empirical analysis from China's Huaihe River Basin. *Natural Hazards*, Vol.93, No.2, pp.803–822, 2018.
- [49] Hall, J. W., Sayers, P. B. and Dawson, R. J.: National-scale Assessment of Current and Future Flood Risk in England and Wales. *Natural Hazards*, Vol.36, No.1–2, pp.147–164, 2005.
- [50] 多田毅: 浸水確率の空間分布を考慮した浸水リスクマップの提案. 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.72, No.4, pp.I\_1339–I\_1344, 2016.
- [51] Falter, D., Schröter, K., Dung, N. V., Vorogushyn, S., Kreibich, H., Hundedcha, Y., Apel, H. and Merz, B.: Spatially coherent flood risk assessment based on long-term continuous simulation with a coupled model chain. *Journal of Hydrology*, Vol.524, pp.182–193, 2015.
- [52] 木内信蔵: 日本の地理 (上). 有斐閣, 1956.
- [53] 貝塚爽平, 鎮西清高: 日本の自然 2 日本の山. 岩波書店, 1986.

- [54] 建設省：新版日本国勢地図. 日本地図センター, 1990.
- [55] 気象庁：台風の接近数. URL（最終閲覧 2018/12/5）：  
<http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typhoon/statistics/accession/>
- [56] 北本朝展（国立情報学研究所）：デジタル台風 台風上陸・通過データベース（完全版）. URL（最終閲覧 2018/12/5）：  
<http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/disaster/landfall-full/>
- [57] 気象庁：地域名. URL（最終閲覧 2018/12/5）：  
[https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo\\_hp/tiikimei.html](https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo_hp/tiikimei.html)
- [58] 国土交通省河川・水資源局：水害統計デフレーター（歴代）.
- [59] 鈴木隆介：建設技術者のための地形図読図入門〈第 1 巻〉読図の基礎, 古今書院, 1997.
- [60] 中国地質調査業協会. URL（最終閲覧 2019/01/27）：  
<http://www.chugoku-geo.or.jp/book/export/html/128>
- [61] 国土交通省：吉野川水系河川整備計画. 2009.
- [62] 建設省：新版日本国勢地図. 日本地図センター, 1990.
- [63] 福井好行：吉野川下流における流路の変遷. 徳島大学学芸学部紀要（社会科学）, Vol.10, pp.1-13, 1960.
- [64] 国土交通省四国地方整備局中筋川総合開発工事事務所：四国地方の地質概要図.  
URL（最終閲覧 2019/01/15）：<http://www.skr.mlit.go.jp/nakasuji/yokose/tisitu.html>
- [65] 吉野川市：吉野川市のプロフィール. URL（最終閲覧 2019/01/15）：  
<http://www.city.yoshinogawa.lg.jp/docs/2010100700012/>
- [66] 石井町：石井町のプロフィール. URL（最終閲覧 2019/01/15）：  
<https://www.town.ishii.lg.jp/docs/2018110800036/>

- [67] Sayama, T., Ozawa, G., Kawakami, T., Nabesaka, S. and Fukami K.: Rainfall-runoff-inundation analysis of the 2010 Pakistan flood in the Kabul River basin. *Hydrological Sciences Journal*, Vol.57, No.2, pp.298–312, 2012.
- [68] Yamazaki, D., Kanae, S., Kim, H. and Oki, T.: A physically based description of floodplain inundation dynamics in a global river routing model. *Water Resource Research*, Vol.47, No.4, 2011.
- [69] 安田浩保, 白土正美, 後藤智明, 山田正: 水防活動の支援を目的とした高速演算が可能な浸水域予測モデルの開発. 土木学会論文集, Vol.740, pp.1–17, 2003.
- [70] Sayama, T.: Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) Model Manual ver.1.4.2. 2017.
- [71] 山崎大, 富樫冨佳, 竹島滉, 佐山敬洋: 日本全域高解像度の表面流向データ整備. 土木学会論文集 B1(水工学). Vol.74, No.5, pp.1\_163–1\_168, 2018.
- [72] Mizuta, R., Murata, A., Ishii, M., Shiogama, H., Hibino, K., Mori, N., Arakawa, O., Imada, Y., Yoshida, K., Aoyagi, T., Kawase, H., Mori, M., Okada, Y., Shimura, T., Nagatomo, T., Ikeda, M., Endo, H., Nosaka, M., Arai, M., Takahashi, C., Tanaka, K., Takemi, T., Tachikawa, Y., Temur, K., Kamae, Y., Watanabe, M., Sasaki, H., Kitoh, A., Takayabu, I., Nakakita, E. and Kimoto, M.: Over 5000 years of ensemble future climate simulations by 60 km global and 20 km regional atmospheric models. *Bulletin of The American Meteorological Society*, Vol.98, No.7, 2017.
- [73] Fujita, M., Mizuta, R., Ishii, M., Endo, H., Sato, T., Okada, Y., Kawazoe, S., Sugimoto, S., Ishihara, K. and Watanabe, S.: Precipitation changes in a climate with 2-K surface warming from large ensemble simulations using 60-km global and 20-km regional atmospheric models. *Geophysical Research Letters*, Vol.45, No.1, pp.435–442, 2019.
- [74] 渡部哲史, 中村みゆき, 内海信幸: アメダス観測点を対象とした d4PDF バイアス補正降水量データセットの開発. 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.74, No.5, I\_127–I\_132, 2018.
- [75] 立川康人, 宮脇航平, 田中智大, 萬和明, 加藤雅也, 市川温, キムスンミン: 超多数アンサンブル気候予測実験データを用いた極値河川流量の将来変化の分析. 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.73, No.3, pp.77–90, 2017.

[76] 影山雄哉, 山田真史, 渡部哲史, 池内幸司: 大規模アンサンブル気候データを用いた降雨の時空間分布による基本高水の不確実性評価. in prep.

[77] 日本学術会議: 河川流出モデル・基本高水の検証に関する学術的な評価—公開説明(質疑)一. 2011. URL (最終閲覧 2019/01/15):  
<http://www.scj.go.jp/ja/member/iinkai/bunya/doboku/takamizu/pdf/haifusiryokoukai3.pdf>

[78] Shrestha, M., Koike, T., Hirabayashi, Y., Xue, Y., Wang, L., Rasul, G. and Ahmad, B.: Integrated simulation of snow and glacier melt in water and energy balance-based, distributed hydrological modeling framework at Hunza River Basin of Pakistan Karakoram region. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol.120, No.10, pp.4889–4919, 2015.

[79] Kateri, M.: Contingency Table Analysis. Springer, 2014.

[80] 徳島県県土整備部: 平成 16 年台風 23 号浸水痕跡マップ. 2004.

[81] Kazama, S., Sato, A. and Kawagoe, S.: Evaluating the cost of flood damage based on changes in extreme rainfall in Japan. *Sustainability Science*, Vol.4, No.1, pp.61–69, 2009.

[82] 町田宗一郎, 風間聡, 沢本正樹: 全国浸水被害額評価のための基礎調査. 第 19 回 (2006 年度) 水文・水資源学会総会・研究発表会要旨集, ID:43, 2006.

[83] 農林水産省中国四国農政局: 平成 28-29 年農林水産統計年報, 2017.

[84] 総務省: 固定資産の価格等の概要調書 (平成 27 年度版), 2016.

[85] Holtz, D., Markham, A., Cell, K. and Ekwurzel B.: National Landmarks at Risk: How Rising Seas, Floods and Wildfires Are Threatening the United States' Most Cherished Historic Sites. Union of Concerned Scientists, 2014 report on climate and cultural heritage in the US, 2014.

[86] 防災科学技術研究所: 水害地形分類図デジタルアーカイブ (1995 年版吉野川流域地形分類図(1)・(2)). URL (最終閲覧 2018/12/30): <http://ecom-plat.jp/suigai-chikei/index.php>

[87] 松浦茂樹: 明治期の吉野川治水計画および治水事業—修築事業を中心に—. 水利科学, No.319, pp.47–81, 2011.



- [88] 科学技術庁資源局：水害地域に関する調査第五部—吉野川流域の水害地域と土地利用—。1963.
- [89] 斉藤享治：日本の扇状地。古今書院，1988.
- [90] 小出博：日本の河川研究。東京大学出版会，1972.
- [91] 三好町：三好町史—地域誌・民俗編—。1996.
- [92] 国土開発調査会：吉野川—その治水と利水—。1987.
- [93] 徳島大学付属図書館貴重資料高精細デジタルアーカイブ整理番号「徳-1」  
URL（最終閲覧 2019/01/05）：<https://www.lib.tokushima-u.ac.jp/~archive/table-t.html>
- [94] 徳島大学付属図書館貴重資料高精細デジタルアーカイブ整理番号「徳-3」  
URL（最終閲覧 2019/01/05）：<https://www.lib.tokushima-u.ac.jp/~archive/table-t.html>
- [95] 澤田健吉，佐々木久：吉野川の歴史。日本土木史研究発表会論文集，Vol.1, pp.49–53, 1981.
- [96] 澤田健吉：吉野川の歴史(その 7)。日本土木史研究発表会論文集，Vol.7, pp.243–251, 1987.
- [97] 土木学会：吉野川第十堰技術評価特別委員会報告書。2007.
- [98] 小出博：日本の河川—自然史と社会史—。東京大学出版会，1970.
- [99] 愛媛大学・国土交通省四国地方整備局：四国防災八十八話。2008.
- [100] 稲垣神社（徳島県吉野川市牛島地区）：稲垣監物碑碑文。
- [101] 国文学研究資料館（所蔵）：村々沼川堰留之図（蜂須賀家文書）
- [102] 国土交通省：吉野川の歴史。URL（最終閲覧 2018/12/30）：  
[http://www.mlit.go.jp/river/toukei\\_chousa/kasen/jiten/nihon\\_kawa/0801\\_yoshino/0801\\_yoshino\\_01.html](http://www.mlit.go.jp/river/toukei_chousa/kasen/jiten/nihon_kawa/0801_yoshino/0801_yoshino_01.html)
- [103] 建設省四国地方建設局徳島工事事務所：吉野川百年史。1993.

- [104] 徳島県立文書館：暮らしの中の吉野川． 2010.
- [105] 徳島県立文書館：古文書が語る石井の歴史． 2017.
- [106] 大日本帝国陸地測量部：明治 29 年測図 1/50000 地形図「川島」． 1896.
- [107] 濱井宣明・中野晋・高西春二：氾濫解析による明治期の吉野川洪水の実態分析および防災への活用方法． 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.70, No.4, pp.1\_1453-1\_1458, 2014.
- [108] 土木学会土木図書館委員会沖野忠雄研究資料調査小委員会：沖野忠雄と明治改修． 丸善, 2010.
- [109] 上田利夫：阿波藍民俗史． 徳島県出版文化協会, 1978.

