

低平水田域における豪雨排水リスクとその不確実性
の評価法に関する研究

2016年12月

皆川 裕樹

低平水田域における豪雨排水リスクとその不確実性
の評価法に関する研究

筑波大学大学院
生命環境科学研究科
博士（農学）学位論文

皆川 裕樹

目次

要旨	viii
第1章 序章	1
1.1 研究の背景	1
1.2 既往の研究	2
1.2.1 豪雨特性と気候変動の影響予測に関する研究	2
1.2.2 水田域における排水過程のモデル化に関する研究	3
1.2.3 水田域の洪水緩和機能と流域管理に関する研究	4
1.2.4 リスクと不確実性の評価に関する研究	4
1.3 目的と研究手法	5
1.4 論文の構成	6
第2章 対象流域の地理情報と豪雨特性の分析	7
2.1 はじめに	7
2.2 選定流域の地理情報	7
2.2.1 選定地域における気候特性の概要	7
2.2.2 流域の概要と土地利用状況	8
2.2.3 農業用水利施設と用排水管理	11
2.2.4 近年発生した豪雨被害の実態	11
2.3 解析資料の特徴と豪雨イベントの抽出	12
2.3.1 長期間の実測降雨データの収集	12
2.3.2 気候モデルによる予測データの収集と特徴	13
2.3.3 気候モデルデータの処理法と切出し範囲	14
2.3.4 豪雨イベントの抽出	16
2.4 適用結果と考察	16
2.4.1 実測の降雨資料からみた豪雨特性	16

2.4.1.1	期間毎の豪雨発生回数と抽出雨量	17
2.4.1.2	発生時期毎の豪雨発生回数と抽出雨量	17
2.4.1.3	最大48時間雨量にみる時間雨量の発生頻度	18
2.4.1.4	最大6時間雨量の発生頻度とその強度変化	19
2.4.2	気候モデルにみる豪雨特性の将来変化	20
2.4.2.1	現在期間のGCM出力値と観測値の比較	20
2.4.2.2	豪雨の出現頻度と雨量強度の将来変化	22
2.4.2.3	WRF出力にみる時間雨量強度の将来変化	24
2.5	本章のまとめ	26

第3章 地域降雨特性を考慮した短時間豪雨の模擬発生法のモデル化 27

3.1	はじめに	27
3.2	豪雨の模擬発生法の全体像	28
3.2.1	模擬発生手順の概要	28
3.2.2	実測豪雨データの特徴	29
3.3	豪雨発生回数および雨量規模の決定手法	30
3.3.1	豪雨発生回数の決定手法	30
3.3.2	豪雨の雨量規模の発生手法	30
3.3.3	1時間雨量への配分割合の決定	31
3.4	内部波形パターンの模擬発生法	32
3.4.1	相関を持つ擬似雨量系列の模擬発生手法	33
3.4.2	短時間雨量値の並べ替えによる内部波形パターンの作成手法	35
3.4.2.1	雨量値の毎時間選択による内部波形の形成	36
3.4.2.2	擬似雨量系列の波形パターンを用いた並べ替え	36
3.5	適用結果と考察	37
3.5.1	実測豪雨から得られたパラメータ	37
3.5.2	豪雨の発生頻度および雨量規模の再現性	38
3.5.3	内部波形特性の再現性	40
3.5.4	豪雨の模擬発生結果と短時間最大雨量の強度分布	43
3.6	本章のまとめ	44

第4章 低平水田域に広がる冠水被害の定量的評価法の提案 45

4.1	はじめに	45
-----	------	----

4.2	広域冠水被害の推定手法の構成	45
4.3	低平水田域の排水システムのモデル化	46
4.3.1	選択モデルの基本構造	46
4.3.2	対象流域の地域モデル	48
4.3.2.1	非氾濫域の流域モデル	48
4.3.2.2	氾濫域の流域モデル	49
4.4	水稻の冠水被害の評価に向けた減収尺度の策定手法	52
4.4.1	冠水被害の評価基準となる減収尺度	52
4.4.2	実水田を利用した模擬冠水試験法	52
4.4.2.1	水稻栽培ポットの整備と使用品種	52
4.4.2.2	試験区の整備と特徴	53
4.4.2.3	冠水試験の手順	54
4.4.2.4	冠水条件の設定と試験スケジュール	54
4.4.3	水稻の生育及び収量調査手法	56
4.5	浸水が発生した水田の抽出と広域冠水被害の推定手法	57
4.5.1	浸水が発生した水田の抽出	57
4.5.2	水稻の生育状況からみた冠水条件の分類と減収尺度の適用	57
4.6	適用結果と考察	59
4.6.1	排水モデルの適用	59
4.6.2	冠水が水稻へ及ぼす影響と減収尺度の策定	61
4.6.2.1	対照区における生育状況	61
4.6.2.2	冠水区の濁度と水温	62
4.6.2.3	粗玄米重の比較	63
4.6.2.4	冠水に伴う玄米の外観品質の変化	65
4.6.2.5	玄米整粒重に注目した水稻減収尺度の策定	67
4.6.2.6	減収尺度の活用面と留意点	67
4.6.3	広域の水田冠水被害の推定	68
4.7	本章のまとめ	70

第5章 不確実性を考慮した広域排水リスクの評価手法の開発

71

5.1	はじめに	71
5.2	水田域の排水に関わる不確実性の分類例	72
5.3	不確実性を含む広域排水リスクの評価手法	72
5.3.1	評価対象とする不確実性	72

5.3.2	気候変動リスク評価のための豪雨データの発生方法	73
5.3.2.1	必要パラメータの抽出と確率分布の当てはめ	74
5.3.2.2	気候シナリオの不確実性を取り込んだ豪雨グループの模擬発生手順	75
5.3.3	広域排水リスクの評価手順	78
5.3.3.1	豪雨グループからの確率雨量の算定方法	78
5.3.3.2	豪雨の発生月および降雨波形パターンの設定	78
5.3.3.3	広域排水リスクの評価項目	80
5.3.4	不確実性の取り扱いとその評価法	80
5.4	従来法による広域排水リスクの評価例	81
5.4.1	入力雨量と水田被害評価のための条件設定	81
5.4.2	降雨波形の変化に注目した広域排水リスクの評価結果	82
5.5	新たな評価方法の適用結果と考察	83
5.5.1	豪雨グループの発生結果と確率雨量の算定	83
5.5.2	河川水位にみる洪水リスクの評価	87
5.5.3	水田被害リスクの推定と評価	88
5.5.4	広域排水リスクの将来変化とその不確実性の評価	91
5.5.5	提案手法のさらなる活用場面と展開	93
5.6	本章のまとめ	94
	章末付録	95

第6章 終章 96

6.1	結果のまとめ	96
6.2	今後の研究展開	97

参考文献 99

謝辞 107

目次

2.1	金沢地方気象台における月降水量および気温の平年値 (1981~2010年)	8
2.2	加賀三湖地区の概要	9
2.3	加賀三湖地区内の土地利用状況	10
2.4	加賀三湖地区内の田面標高の分布	10
2.5	2006年7月16~18日に発生した豪雨時の柴山瀉と周辺の浸水被害の様子 (北國新聞2006年7月18日付朝刊より抜粋)	12
2.6	GCMs および WRF のデータ範囲	15
2.7	各年の実測豪雨の抽出回数	16
2.8	期間毎の最大48時間雨量中の1時間雨量の発生頻度	19
2.9	豪雨期間中の最大6時間雨量の発生頻度	20
2.10	対象地区周辺における実測と GCM の現在期間の月降水量の比較	21
2.11	GCM の現在期間にみる月毎の豪雨発生頻度	21
2.12	GCM 出力にみる抽出豪雨の雨量平均値と変動係数の変化	23
2.13	WRF 出力にみる現在に対する将来期間の最大雨量の増加傾向	25
3.1	豪雨の模擬発生手順の概要	29
3.2	各ステップの配分割合 d_n の決定手順	32
3.3	無次元化された実測豪雨の内部波形パターン (金沢地方気象台での例)	33
3.4	パラメータ C , M による u_2 のとる分布形状の変化	34
3.5	雨量値の大きさの順位並びに注目した並べ替え	37
3.6	実測および模擬発生による各月の豪雨の発生頻度	39
3.7	実測および模擬発生による総雨量の積算頻度分布	39
3.8	実測および模擬発生による1時間雨量の発生分布	39
3.9	実測および模擬発生雨量系列の自己相関係数	41
3.10	雨量値の並べ替えによる模擬発生豪雨の内部波形パターン	42
3.11	模擬発生豪雨データの抽出例	43
3.12	実測および模擬発生豪雨中の各時間最大雨量の積算頻度分布	44
4.1	加賀三湖地区における非氾濫域の流域分割	49
4.2	低平地タンクモデルのブロックダイアグラム	51

4.3	模擬冠水試験区的设计概要	53
4.4	完成した模擬冠水試験区	53
4.5	模擬冠水試験中の様子 (完全冠水と葉先露出状態)	55
4.6	適用モデルによる水位及び流量ハイドログラフの検証	60
4.7	適用モデルによる各水田の最大湛水深の解析結果	61
4.8	対照区の生育調査結果	62
4.9	対照区と冠水処理区における粗玄米重の比較	64
4.10	冠水処理による水稻外觀の変化	64
4.11	対照区における玄米品質の判別結果	65
4.12	冠水による玄米の外觀品質への影響 (2012年と2014年の平均)	66
4.13	玄米重量と品質の低下に注目した水稻減収尺度	68
5.1	気候シナリオにみる豪雨特性の不確実性に対する確率分布の当てはめ	75
5.2	気候シナリオの不確実性を考慮した豪雨グループの模擬発生フロー	77
5.3	不確実性を備えた確率雨量値の推定イメージ	79
5.4	リスクの分布変化による不確実性評価の流れ	81
5.5	雨量規模と水稻被害量の関係に見るリスク評価結果 (柴山瀉系統での例)	82
5.6	各RCPシナリオでの豪雨発生回数の模擬発生結果	84
5.7	豪雨グループから得た評価期間毎の確率雨量の平均	85
5.8	気候シナリオの不確実性を考慮した確率雨量の発生頻度分布 (10年確率雨量の例)	86
5.9	柴山瀉地点におけるピーク水位の分布と危険水位の超過割合 (現在期間の結果)	87
5.10	豪雨量の強度と発生月を考慮した水稻被害リスクの不確実性 (現在期間における10年, 30年, 100年確率の例)	89
5.11	気候シナリオの不確実性を考慮した被害金額の分布	90
5.12	雨量規模と水稻被害金額の期待ショートフォールの関係 (現在期間の例)	90
5.13	水田被害リスクの不確実性にみる分布形状の将来変化 (RCP8.5シナリオにおける10年確率の例)	91
5.14	現在期間からみた将来のリスク変動割合 (10年確率雨量における期待ショートフォールES ₉₀ での比較)	92

表目次

2.1	実測資料データの期間	13
2.2	実測資料の降雨発生時期	13
2.3	収集した GCM データの特徴	14
2.4	GCM データの分析のための設定期間	15
2.5	期間別の豪雨発生回数 (回) と継続時間毎の雨量平均値 (mm)	18
2.6	時期毎の豪雨発生回数 (回) と継続時間毎の雨量平均値 (mm)	18
2.7	GCM における現在期間からみた将来期間の豪雨発生頻度の変化割合	23
3.1	実測資料より得た各月の年平均豪雨発生回数	38
3.2	実測値より得たガンマ分布のパラメータ	38
4.1	模擬冠水試験の冠水条件	55
4.2	実施した冠水試験のスケジュール	56
4.3	水田水深別の水稻冠水状況の分類	58
4.4	冠水区内の平均濁度	63
4.5	浸水発生水田における水稻の冠水期間とそれによる減収量	69
5.1	豪雨排水リスクに関わる不確実性の種類とその分類例	73
5.2	従来法で使用した豪雨の再現期間とその雨量規模	82
5.3	時系列でのリスク評価期間の設定	83
5.4	水稻の栽培期間中における豪雨の相対発生割合	84
5.5	豪雨グループの模擬発生法に用いた各月の豪雨発生頻度 λ の平均と分散	95
5.6	豪雨グループの模擬発生法に用いた豪雨量および変動係数の平均と分散	95

要 旨

近年は全国において活発な梅雨前線や台風に伴う激しい豪雨が頻繁に観測されている。低平地に広く展開されている水田域ではこの豪雨によって内水氾濫、浸水被害が引き起こされており、対応策の開発が望まれる。さらに将来は、気候変動等の影響によって極端な降雨がより強く、頻繁化する可能性が高いとされ、この被害リスクはさらに上昇する恐れがある。一方で、水田域が備える洪水緩和機能は、ダムなどの構造物に頼らない気候変動対策の一つになる可能性を秘めている。この機能を核とした流域一体の水管理手法は、水田農業が中心となるモンスーンアジア域では特に有効と考えられ、その実現のためには適切な農地の活用方法の検討が重要となる。ただし、このような流域管理を計画するためには、そのプラス効果と共に、流域内河川での洪水発生や農地湛水による作物減収のリスク（併せて広域排水リスク）を定量的に示す必要がある。また、リスクを評価する際には様々な要素が複雑に影響し合うため、結果に不確実性を含むことになる。そのため、リスクと併せてこの不確実性を評価する手法が求められるが、低平水田域の排水問題を対象とした研究では未だ提示に至っていない。そこで本研究では、農地を活用した流域管理手法の実現に向けて、豪雨が低平農地域に及ぼす広域排水リスクをその不確実性と併せて評価する手法を開発する。ここではまず、長期間の実測資料及び気候モデルから抽出した豪雨データを分析し、過去から現在、また将来にかけての豪雨の地域特性と変動傾向を明らかにする。それと同時に、その特性を備えた短時間豪雨データの模擬発生法を確立する。さらに低平水田域を対象とした排水過程のモデル化と、水田における水稻冠水害の評価指標を構築し、広域の水田被害評価手法の土台を築く。最終的にこれらの成果を活用し、広域排水リスクを評価する。その際に入力値となる豪雨データでは、複数の気候モデルで予測された気候シナリオ間に存在する不確実性を明確にし、その特性を取り込んだデータを用いることで最終的に得られるリスクの不確実性を明らかにする。

第1章では、まず低平農地域における豪雨災害の現状とそれに対する気候変動の影響が予測されている事実を研究の背景として挙げながら、目的である広域排水リスク評価に関連する既往研究をレビューし、残された課題を総括して本研究を位置付けた。第2章では、まず研究の対象地区の地理情報と気象・水文特性の特徴を整理した。その上で、長期間の実測と気候モデル（GCM）予測値の降雨データを収集し、そこから抽出した豪雨イベントに的を絞ってその特性と変化傾向を分析した。その結果、実測値では過去と比較して近年の雨量強度に増加傾向がみられ、短時間に雨量が集中化してきている可能性が示された。GCMからは複数の気候シナリオを入手し分析した結果、どのシナリオにおいても将来には豪雨が頻発化、強大化することが明示され、低平地排水に対する気候変動への対応策

の必要性がより鮮明になった。ただしその変化傾向は気候シナリオによって大きく異なり、気候予測の不確実性が示された。第3章では、2章で明らかにした実測豪雨の特性を統計的に備える、短時間豪雨データの模擬発生法を開発した。考慮するのは実測値にみる豪雨の月別発生頻度、日及び時間単位の雨量強度、降雨波形特性とし、最終的に得られたデータはそれぞれの特徴を十分に再現できていることが示された。本手法により、防災関連分野など様々な豪雨波形の入力を必要とする解析に利用可能な豪雨データを無数に発生させることが可能となった。第4章では、低平地域における農地—排水路を通じた排水過程をモデル化し、広域排水リスク評価のための解析を可能とした。同時に、このモデルの出力から水田の湛水深と継続時間を抽出し、そこで栽培される水稻被害を評価する一連手法を提案した。その評価では、実証試験を通じて新たに策定した水稻減収尺度を指標とし、冠水時期や継続期間によって大きく異なる水稻の被害特性を考慮した。第5章では、前章までの成果を活用しながら、最終目的とする不確実性を考慮した広域排水リスクの評価法を開発した。ここでは、様々な要因の中から結果に与える影響が特に大きいと考えられる気候シナリオ間の不確実性に焦点を当てた。まず、シナリオ毎に抽出した豪雨特性のバラツキを不確実性と定義し、そのそれぞれの特性値に対して確率分布を当てはめ出現確率を定義する手法を提案した。さらに3章で開発した模擬発生手法を採用し、必要パラメータを定義した豪雨特性の確率分布より抽出することで気候シナリオの不確実性を反映させた多数の豪雨グループを得た。各グループから推定される確率雨量値のそれぞれを4章で示した被害評価のための一連手順に入力し、豪雨が及ぼす広域排水リスクとその不確実性を評価した。ここでは、入力雨量の降雨波形と発生月も模擬発生させており、生育時期によって大きく異なる水稻の被害特性も考慮した評価を実施した。その結果、雨量規模の違いや、現在から将来にかけての評価期間による広域排水リスクの不確実性が確率的に示すことができ、最終目的を達成できた。これらの情報より、土地改良事業等の計画立案において将来の気候変動リスク取り入れた中・長期的な目標を見据えることが可能となった。さらに、流域の中で農地も含めた農業用水利施設が果たせる洪水緩和機能を定量的に評価することによって、豪雨時に被害を最小限に抑えるための流域一体管理手法の開発に展開することが考えられる。

第1章

序章

1.1 研究の背景

現在、日本には約244万haの水田が存在し（農林水産省大臣官房統計部，2014）^[84]，低平地域を中心に広く展開されている。一方で，近年は全国において活発な梅雨前線や台風に伴う激しい豪雨が頻繁に観測されており（気象庁，2015）^[42]，低平地域では排水能力の制約による水田の内水氾濫や，それに伴う水稲の湛水被害が引き起こされている。その面積は全国で年平均43万ha，被害金額では数十億円に上る年もあり（農林水産省大臣官房統計部作物統計の平成17～26年度より集計，ただし風害を含む），現在でも水稲の主な減収要因となっている。さらに将来は，気候変動の影響により日本近辺でも豪雨がより強くなり，頻繁化する可能性が高いと予測されているため（例えば気象庁，2013）^[40]，今後もこの被害リスクは上昇すると考えられる。

これを受けて，各省庁でも気候変動に対する取り組みを強化しており，H27年度に閣議決定された「気候変動の影響への適応計画」（環境省，2015）^[37]では，その影響を最小化あるいは回避し，迅速に回復できる持続可能な社会の構築を目指すとされている。これらの実現に向けて，低平水田域の排水に関しては地域の排水能力の増強や，関連する施設設計の計画基準の更新等の対策が挙げられるが，そのためにはまず対象地域における過去から現在，さらに将来の豪雨特性の変化を十分かつ詳細に把握する必要がある。さらに，後背山地からの流出や，低平地域の広域の排水過程をモデル化し両者を結合させることで，豪雨が流域全体に及ぼす排水リスクを定量的に示す必要がある。一方で，水田域の備える多面的機能の一つである洪水緩和機能は，下流にある都市域での洪水のリスクを低減させる効果が期待され，将来的にはダムなどの大規模構造物に頼らない気候変動対策の一つになる可能性を秘めている。この機能を核とした緊急時の流域管理手法は，水田農業が中心となるモンスーンアジア域では流域全体の被害軽減のために有効と考えられ，その管理手法の検討も重要な課題といえる。

そこで本研究では，豪雨時の流域管理手法の開発を見据え，まず過去から将来にかけての長期間の豪雨特性の変化傾向を明らかにし，同時に豪雨の模擬発生過程をモデル化する。次に，低平水田域を対象として，そこでの広域排水過程のモデル化と水稲の冠水被害評価手法を軸とした広域排水リスクの評価法を提案する。さらに，複数の将来気候シナリオ間に見る豪雨特性の不確実性に注目して，それを確率的に表す手法を提案する。最終的にこれらの成果を活用し，不確実性を考慮した低平農地域における広域排水リスクの評価法を開発することを目的とする。

1.2 既往の研究

1.2.1 豪雨特性と気候変動の影響予測に関する研究

流域の浸水・氾濫といった水害の発生過程の解明や対応策の検討では、対象地域の気象・水文特性の実態把握が不可欠である。特に水害の誘因となる豪雨については、その地域特性を明らかにするため、発生頻度や降雨強度等に焦点を当てた統計的手法を中心とした様々なアプローチがなされてきた（例えば中島ら，1969；江藤ら，1986；増本，1993）^[77,10,59]。大規模豪雨に対する防災計画において、安全性評価の計画基準となる確率雨量規模は、計画対象により経済性を考慮した上で概ね定められており、例えば農地を対象とする排水計画では10年確率程度の雨量が用いられる（農林水産省農村振興局，2006）^[87]。この確率雨量規模の算定では、Gumbel分布等の極値分布を年最大値のデータ系列に対して当てはめて推定する手法が一般的であるが、その他にもある閾値以上のデータを全て用いる Peak Over Threshold (POT) 理論（例えば星，1998；近森，2012）^[24,6]や、気候特性が類似する近隣観測点のデータを合わせて扱う地域頻度解析手法（例えば近森，2013）^[7]など、様々な手法が提案されている。しかし一方で、同じ地点でも過去から現在までの長期間の降水資料を見ると気候の地域特性が経年変化し、この確率雨量値も使用するデータ期間によって変化している可能性が指摘されている（近森・永井，2002）^[5]。さらに全国を面的に見ても多くの地域で同様の傾向が現れており（寒川・鈴木，2008；工藤ら，2010）^[98,52]、確率雨量値を基準とする防災計画や水利施設の設計、安全性評価を行う際には水文データの期間やその取り扱い方法に注意を要する。

また近年は気候変動問題が注目されており将来的にも気候特性が変化する可能性が示されている。このため、世界各国で全球気候予測モデル (General Circulation Model, 以後 GCM) を構築し、物理的に将来気候を予測する手法が開発されている。この気候変動によって気温の温暖化をはじめとした様々な現象に影響が出ると予想されるが、豪雨や台風規模についてはその強大化が予見されており（例えば Tsuboki et al, 2015）^[119]、河川に注目した水害の発生頻度やそのリスク上昇が指摘されている（例えば和田ら，2006；佐山ら，2008）^[123,100]。さらに、気温変化による融雪時期の移動等によって代掻き期である春先の農業用水量へ影響することも指摘されている（工藤ら，2012，2016；小槻ら 2013a, 2013b）^[53,56,50,51]。このように、将来は水害と共に水資源の逼迫も課題となる可能性があることから、これらの両方のリスクを十分に評価したうえで、今後の利水・治水計画に反映させていく必要がある。一方で GCM による気候値の計算には膨大な計算リソースが必要となる他、そのデータは観測値と比較すると一般的に系統誤差を含んでいるため、洪水や水資源評価に用いるためにはバイアス補正等の処理が必須となる。また、計算格子間隔が数十～数百 km と広いことから、流域レベルでの水資源評価等に用いるにはデータを空間的にダウンスケールする必要がある。その上、現状では気候値が日単位で出力されることが多いため、洪水氾濫などの評価に用いるためには短時間単位への時間的ダウンスケールも求められる。このように、GCM の将来予測データは貴重な情報でありながら、その取り扱い

いは未だ容易ではない。さらに後述するように、使用する気候モデルや計算初期値、RCPシナリオの種類によっても結果が異なりそこに不確実性を含むことから(道広ら, 2011)^[67]、将来の気候変動の影響やその不確実性を見据えた治水・利水計画の策定方法の提示には至っていない。

1.2.2 水田域における排水過程のモデル化に関する研究

豪雨に対する防災計画の策定では、計画基準の豪雨をモデル入力として得られる河川水位、流量等のハイドログラフ情報が安全性評価の重要な判断要素となる。解析モデルは様々なものが提案されており、その形態によって大きく集中型のモデルと分布型のモデルに分類される。集中型モデルは多くの適用事例があるタンクモデル(菅原, 1972)^[105]が代表的であり、そのパラメータの同定法も多く提案されている(例えば永井・角屋, 1980; 田中丸, 1993)^[75,112]。流域を複数の斜面、あるいは正方形等のグリッドで分割し表現する分布型の流出モデルは、地形情報を活用したTOPMODEL(Beven et al, 1979)^[2]、キネマティック法による表面流出モデル(例えば角屋, 1980)^[32]や人為的操作である農業水利用や施設操作を組み込んだ分布型水循環モデル(谷口ら, 2009a, 2009b, 2009c; 吉田ら, 2012b)^[113, 114, 115, 130]等がある。昨今はパーソナルコンピュータやリモートセンシング技術の進化、GIS情報の整備と共に必要情報の取得が容易になり、現在ではこちらの分布型モデルの開発が主流となっている。

一方で緩勾配の低平地域では、河川や水路の流れが下流水位の影響を受けやすく、洪水時には本川から支川への逆流が発生する場合もある。また水田域では雨水や氾濫水の貯留による流出の遅延効果が発揮される。そのため、低平地域の排水解析における水路流れは不定流式によるダイナミックウェーブとして扱われ(例えば早瀬・角屋, 1976)^[15]、さらに水田の特徴である落水口と流出の関係(四方田ら, 1976)^[128]、機械排水の効果(例えば豊田, 1977)^[118]などが調査され、モデル開発に取り込まれてきた。これらの解析手法は様々な地区に適用され(例えば丹治ら, 1986; 大西ら, 1988; 柚山ら, 1988)^[116,94,134]、排水能力診断や農地湛水状況の評価に利用されてきた。その後、排水路流れを不等式で表現することで簡易化し、計算負荷を大幅に削減しながらも従来の手法と比較して十分な解析精度を持つ低平地タンクモデルが開発され(角屋・早瀬, 1981; 早瀬・角屋, 1993a, 1993b)^[33,16,17]、こちらの手法も各地に適用されてきた(例えば増本ら, 1992; 早瀬・角屋, 1993c)^[58,18]。

気候変動により将来の豪雨特性や雨の降り方が変化した場合には後背山地からの流出も影響を受け(近森・永井, 1999)^[4]、その下流にある低平農地域では排水の負担が高まる可能性がある。その他にも、農地の宅地化といった土地利用変化の影響や(例えば角屋・早瀬, 1979; 角屋, 1985)^[31,34]、上流域の貯水池操作なども下流域に影響を及ぼす要因と考えられる。そのため、これらの影響を総合的に判断し、流域全体を管理していくためには上流から下流までを一体的に解析し、さまざまな要因の相互影響を見ること必要がある。近年では、降雨流出と氾濫を同時に取り扱うRRIモデル(Sayama et al, 2012)^[101]や農業水利用と氾濫プロセスの一体解析を試みたシームレスモデル(Vongphet et al, 2015)^[121]の開発を通じてその影響が評価されているものの、気候変動への対応策としての流域管理方策を提

案するまでには至っておらず、今後の課題として残っている。

1.2.3 水田域の洪水緩和機能と流域管理に関する研究

低平域に分布する水田域は豪雨時に浸水被害を受ける対象である一方で、多面的機能の一つとして雨水や氾濫水を一時的に貯留する洪水緩和機能を備えており、これまでにその機能について様々な評価がなされてきた（例えば志村，1982；早瀬，1994；Masumoto et al, 2006）^[103,19,62]。現場での例としては、近年新潟を中心に広がっている田んぼダムの効果（吉川ら，2009；宮津ら，2012）^[131,72]も定量的に評価されている他、実災害時にこの機能が発揮された事例も示されている（増本，2010）^[64]。昨今は農村部の混住化が進行しており、緊急時には水田域で浸水・氾濫をある程度許容することで都市域を守る流域一体型の治水対策（例えば増本，1998；早瀬，2001）^[61,20]の果たせる役割は大きいと考えられる。しかし、農業用排水施設の能力には限界があり、水田を無計画に活用すると、そこで栽培されている水稻の冠水被害リスクが上昇する恐れがある。そのため、実際に流域管理手法としてこの機能を活用するためには、周辺域の被害軽減効果と同時に水田内の水稻被害リスクを十分に検証し、流域全体の浸水被害を最小化するような計画を検討するべきである。浸水被害評価手法の代表的なものとしては治水経済評価マニュアル（国土交通省河川局，2005）^[47]が定められており、農地の場合は浸水深と継続期間から定まる被害率を作物価値に乘じることで被害額を算定する（例えば小林・寶，2009，2010）^[44,45]。ところが水稻が対象の場合は、冠水の発生時期（＝水稻の生育時期）やその他の条件によって被害度合いが大きく異なるため、灌漑期間を通じて一律での評価は適切ではなく、都市被害に比べその評価手順が複雑になる。

上述のような流域管理にむけた遊水地の整備は現在も進められているが、さらに多くの農地を活用していくためには、被害の補償問題とも関連するため氾濫時の状況を詳細に反映させた被害評価に基づく計画立案が不可欠である。ところが、上記のように水田域の被害評価は煩雑であるため、その定量的な評価手法は確立されていない。さらにこの流域管理は、将来的な気候変動の影響までもみた長期的なリスク評価に基づき対応策を検討する必要がある。前述のように河川に注目した気候変動の影響は評価されているものの、水田を中心とした低平農地域の排水問題には適用されていない。

1.2.4 リスクと不確実性の評価に関する研究

ここで「リスク」とは、危険や危険度と訳されることが多く、人間の生命や経済活動にとって望ましくない事象の発生の不確実さの程度及びその結果の大きさの程度を示す（リスク学事典編集委員会，1993）^[96]。一般的に潜在的な悪影響や望ましくない影響の意で使われることが多いが明確な定義は難しく、そのニュアンスは対象分野によってやや異なる。例えば医学分野では生命や健康を対象とし、金融分野では価値の損失が対象となる（日本リスク研究学会，2006）^[78]。一方で自然災害分野を対象

とした場合には、その発生確率と被害規模の積、あるいは外力であるハザードと脆弱性を用いて評価するのが一般的である（例えば馬奈木，2013）^[57]。ここで、各分野の共通認識としてあるのは、「リスクの本質は不確実性にある」とされていることであり、その理由として、リスクは未来の出来事でありそれがもたらす不確実性を完全に克服はできない点などが挙げられている（松原，1989）^[65]。その不確実性の種類には、事象のシナリオに関するもの、パラメータに関するもの、モデルに関するものなどの他、もっと根本的には偶発的なもの、未解明なもの、本質的なもの、交渉条件的なものなど、性質の異なるものが混在している（池田・盛岡，1993）^[26]。このように、リスクには様々な不確実要素が複雑に絡みあうため断定的な評価は困難であり、リスク評価ではそこにある不確実性による結果の曖昧さを同時に示す必要がある。

本研究で取り扱う豪雨に関しても、事業の計画基準にも用いられる確率雨量値は算定手法や標本サイズによって変化し（寶・小林，2009）^[107]、確率分布の適合性にも課題がある（北野ら，2011）^[43]。また雨量強度は時空間的に変化し解析結果に影響することから（田中ら，2015，2016）^[109,110]、雨量の観測精度の向上も重要となる（増本ら，1993）^[60]。さらに豪雨を入力し洪水量を計算するモデルの種類やパラメータによっても不確実性が生じる（例えば佐山ら，2005；Kayastha，2014）^[99,39]。近年注目されている気候変動の影響を見る場合には、使用するGCMによる不確実性が大きく（Kay et al, 2009；道広ら，2011）^[38,67]、そのデータのバイアス補正方法もその後の評価に影響を及ぼす（工藤ら，2014）^[54]。これらのことから、リスクを示す際には同時に想定される不確実性を評価し、併せて示すことが重要といえる。工藤ら（2016）^[56]はGCMの日単位データより推定された将来の農業水資源に対する気候変動影響を不確実性と共に示したが、より短期的な現象である洪水・農地氾濫を対象とするためには、GCMデータを解析に必要な短時間単位へ変換する工夫が必要となる。その他、前述のように低平農地域ではわずかな標高差や農地貯留等の影響によって水が非線形的で複雑な動きを示し、被害対象となる農作物の種類や浸水の発生時期等によっても評価結果が大きく異なることも、リスク評価を複雑にしている一因といえる。このような理由から、低平地農地域を対象とした分野では未だ豪雨がもたらすリスクとその不確実性の評価手法が確立されておらず、将来起こりうる気候変動等の影響評価やその対応策の議論が進んでいないのが現状である。

1.3 目的と研究手法

上記の既往研究状況を踏まえた上で、本研究では豪雨が低平水田域に及ぼす広域排水リスクとその不確実性の評価法を開発することを目的とする。このため、以下の手法によって研究を進める。

- 1) 低平地域の排水に影響を与える豪雨に注目し、対象地区の長期間の実測値と気候モデルによる予測シナリオより、豪雨特性の経年変化の実態と将来変化傾向を詳細に分析する。
- 2) 分析した豪雨データ群の特性を統計的に備え、様々な解析の入力値として活用できる短時間豪雨データの模擬発生法を開発する。これにより、リスク評価のための入力豪雨の発生を可能とする。

- 3) 低平域の排水過程をモデル化し、豪雨時における水田域の湛水状況の変化を詳細に解析する。同時に、実証試験を通じて水稻の冠水被害の評価指標を構築し、両者を組み合わせた豪雨時の広域水田被害の定量的評価手法を提案する。
- 4) 低平水田域のリスク評価に関わる不確実性要因に注目し、その出現特性を確率的に表す手法を提案する。その結果を上記の水田被害評価法へ反映させることで、最終的に得られる広域排水リスクとその不確実性を定量的に評価する。

1.4 論文の構成

本章では研究の背景と目的、および研究手法について述べた。次に第2章では、対象とする地区の概要を述べると共に、低平地域の排水へ影響を与える豪雨に注目しその地域特性を示す。ここでは長期間の実測値と気候モデルによる将来予測値の分析を通じて、過去から現在まで、さらには将来の豪雨特性の変化傾向を明らかにする。続く第3章では、第2章で分析した実測豪雨の地域特性を備える雨量データの模擬発生法を開発し、その適用結果の検証を行う。また第4章では、対象地区の排水システムをモデル化し、低平農地域の詳細な氾濫・湛水状況の解析を可能とする。さらに解析で得た水田水深の出力に対して、詳細な実証試験に基づいて策定した水稻の減収尺度を適用し、流域全体の水田被害を容易に推定する手法を提案する。そして第5章では、2章から4章で示した知見を併せて活用し、広域排水リスクの評価のための一連手法を開発する。ここでは、不確実性要因の一例として複数気候シナリオ間の豪雨特性に見る不確実性を確率分布で定義する。その分布を入力豪雨データ群の模擬発生に活用することで、最終的に気候シナリオ間の不確実性を反映させた広域排水リスクとその不確実性を定量的に評価する手法を開発する。最後に第6章では得られた結果をまとめると同時に今後の研究展開について述べ、本論文を締めくくる。

第2章

対象流域の地理情報と豪雨特性の分析

2.1 はじめに

豪雨特性の変化が低平農地域排水へ与える影響を評価することを最終目標として、本章ではそこでの基礎データとなる豪雨イベントの抽出法と各豪雨特性の分析手法について述べる。そのためにまず研究の対象地区を選定し、地理情報を整理することで地区の特徴を示す。さらにその地区周辺における過去から現在までの実測降雨データと共に、気候モデルを用いた地球温暖化実験結果である気候シナリオを複数収集する。それらの両データ系列より分析対象となる豪雨イベントを抽出し、豪雨の発生頻度や雨量強度などいくつかの豪雨特性について過去から現在、さらに気候変動を想定した将来にかけての変化傾向を定量的に評価する。

2.2 選定流域の地理情報

本研究では、石川県下の一級河川梯川の南部にあり、小松市と加賀市にまたがる低平農地域である加賀三湖地区を調査対象地区に選定した。以下にその地区の特徴と地理情報の概要を記す。

2.2.1 選定地域における気候特性の概要

対象地区がある石川県は北陸地方に属しており、典型的な日本海側気候である。県下にある金沢地方気象台での観測値によると、年降水量の平年値（1981～2010年）は約2,400mmと全国平均（約1,750mm）と比較して多く、季節で見ると秋から冬にかけて降水量が増加する特徴がある（Fig. 2.1）。同時に冬季は日照時間が減少し曇りの日が多い。また冬季には白山連峰などの山間部を中心に降雪量が多く、春先に発生する融雪水は農業分野においても重要な水資源となる。山間部には気象観測点がなく積雪水資源量の直接観測は困難であるが、小型温度ロガーを用いた積雪深調査（藤原ら，2015）^[12]や数値モデルによる融雪推定手法が提案されており（能登ら，2010；高瀬ら，2016）^[81,108]、農業用水資源の評価がなされている。この評価によると、例えば手取川流域において近年は積雪量の減少傾向が示されており（能登ら，2011）^[82]、過去から現在までに季節の気候特性が変化してきている可能

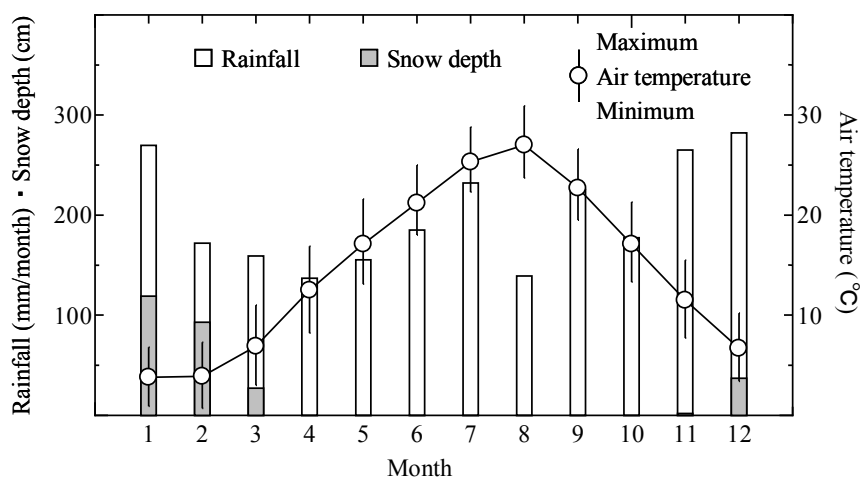


Fig. 2.1 金沢地方気象台における月降水量および気温の平年値 (1981～2010年)

性もある。ここで、この金沢での各平年値に対して対象地区内にある AMeDAS の小松地点での値と比較すると、降水量、気温は共にやや低いものの、季節の変動傾向は同様であり、両地点間で大きな気候の差はないといえる。

2.2.2 流域の概要と土地利用状況

対象とする加賀三湖地区 (Fig. 2.2) は石川県小松市と加賀市にまたがり、流域面積は約 240km² (山間部約 120km², 低平部約 120km²), 全体で約 4,000ha の水田が広がる穀倉地帯である。地区内低平部には柴山潟, 木場潟の 2 つの潟を有している。本地区にはかつて, 両潟の他に今江潟があり, この 3 つの潟が地区名 (加賀三湖) の由来となっている。しかし, 戦後の食糧不足解消のため, 1952 年より開始された国営加賀三湖干拓事業により今江潟の全面と柴山潟の一部が干拓され, 581ha の農地が造成された。同時に, 周辺農地の排水改良のため, 新堀川 (柴山潟から日本海へ排水する河川) の掘削, 八日市川等の周辺河川の改修, 排水機場の設置, 防水堤の築造等も行われた。なお, 木場潟は用水源及び洪水調整池として, その全面が残された。その後, 県営農地整備工事 (1968～1975 年) により干拓地は一区画 50a の大区画となり, さらに県営土地改良事業等によって周辺農地の区画整理や干拓地および周辺の用水・排水条件が改良・整備されていった。また平成 6 年より開始された国営加賀三湖周辺農地防災事業により, 地盤沈下で機能低下が発生した柴山潟堤防の嵩上げ, 新堀川潮止水門の補修等がなされた (農林水産省北陸農政局石川農地防災事業所, 2007) [86]。本地区は, 低平域の大部分は水田として活用されているが, 地区内に含まれる小松市街地 (地区内の東側, 木場潟～前川周辺) では小松空港を抱える他, 都市化が進行した影響で宅地の割合も高くなっている (Fig. 2.3)。地区内にある加賀三湖土地改良区からの聞き取り結果では, 降雨時には都市域からの排水が農業用水路等に流入することで排水施設の負担となっている状況も指摘されている。また, 特に 2 つの潟周辺と干拓農地では海水面以下の低標高の水田が広がっており (Fig. 2.4), 最低部では海拔 -3m にもなる。

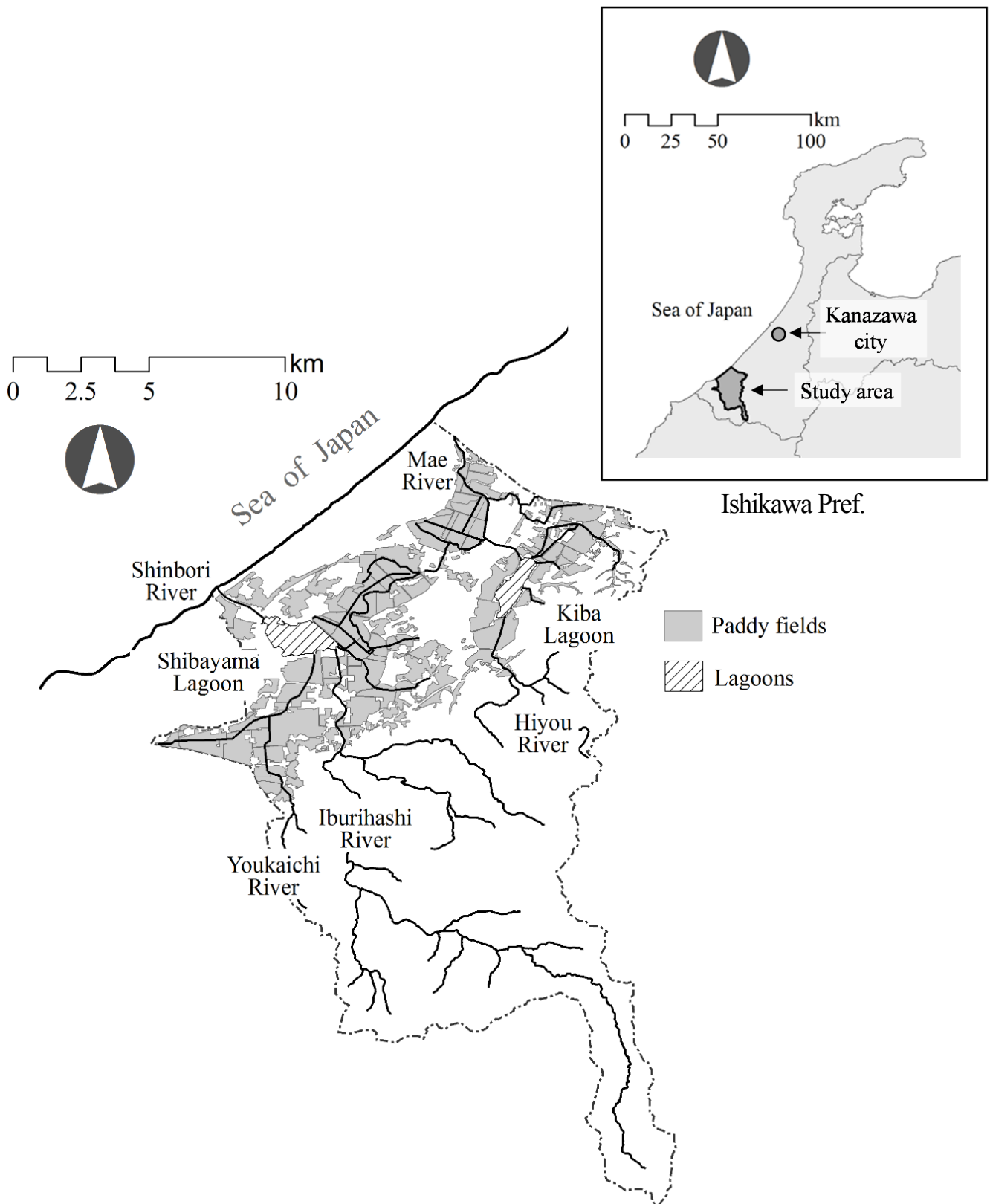


Fig. 2.2 加賀三湖地区の概要

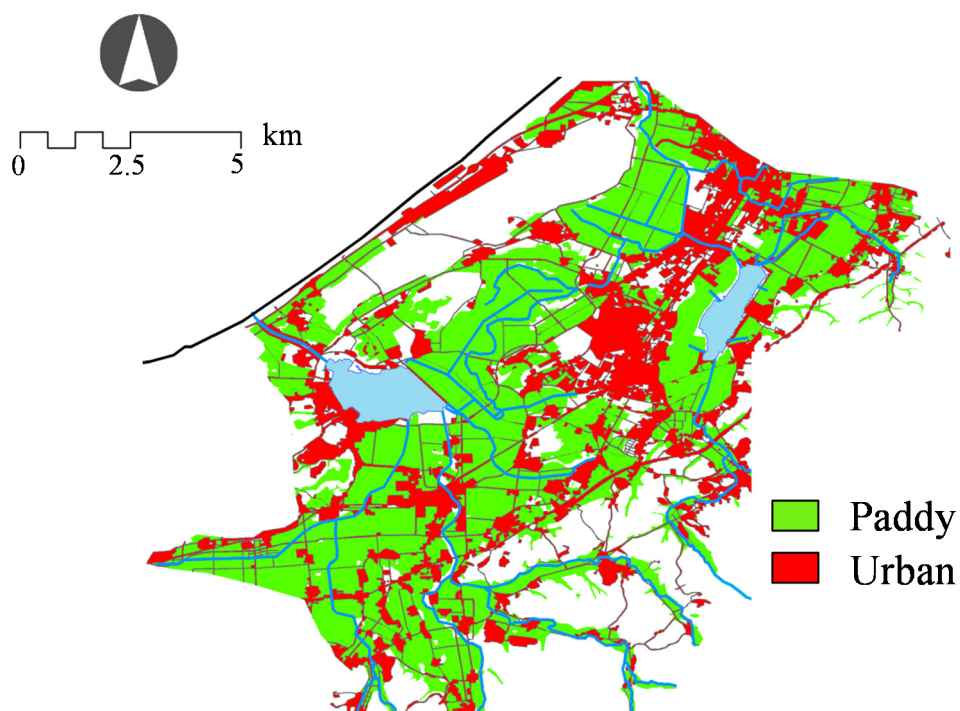


Fig. 2.3 加賀三湖地区内の土地利用状況

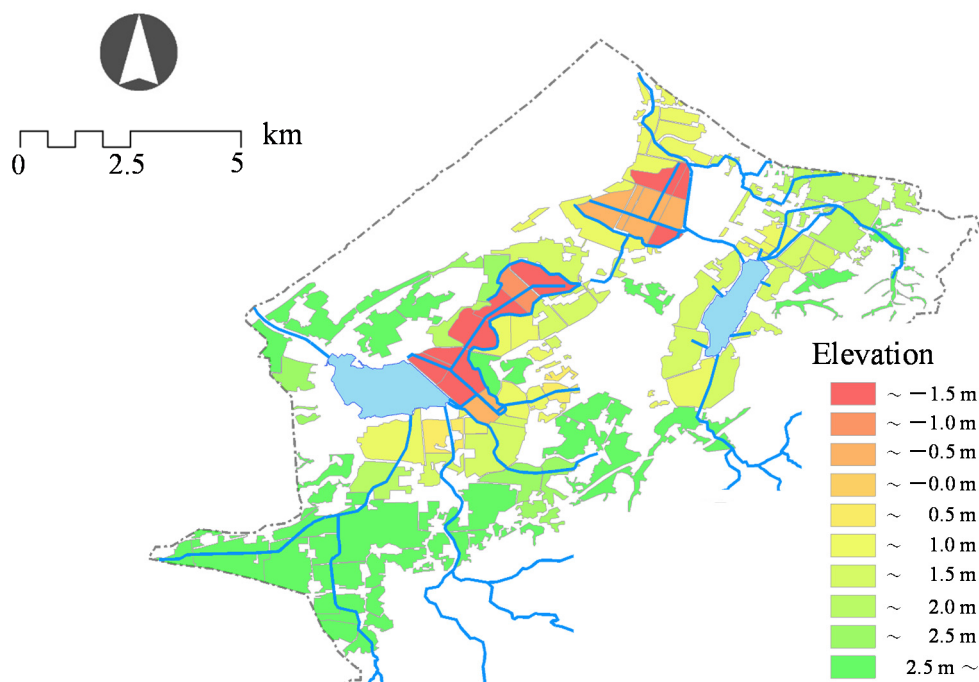


Fig. 2.4 加賀三湖地区内の田面標高の分布

2.2.3 農業用水利施設と用排水管理

本地区の排水管理の特徴として、排水系統が八日市川（流域面積約 5.0km²）、動橋川（88.9km²）から柴山潟に流入し新堀川から日本海に抜ける系統（以後、柴山潟系統）と、日用川（12.0km²）から木場潟に流入し前川から梯川河口付近に排水される系統（以後、木場潟系統）の二つに分かれている。この二つの系統は串川により接続しており、豪雨時などの緊急時には連携して排水操作を行う場合があるものの、基本的には樋門により分断され別の排水系統とされている。本研究では、これらをそれぞれ別系統として扱うこととした。さらに地区内には多くの排水機場が設置されており、主なものは柴山潟系統で 5 ヶ所、木場潟系統では 12 ヶ所に整備されている。さらに両排水系統の出口に当たる河口付近には、海からの塩水浸入を防ぐための防潮水門がそれぞれ設置されている（新堀川水門、前川排水機場水門）。

また用水については、通常時は柴山・木場潟の両潟流入河川を用水源としているが、夏期に用水不足が発生する場合がある。これを受けて、国営手取川農業水利事業（昭和 27～43 年）の一環として手取川支流の大日川に大日川ダム（有効貯水量 23,900×10³t、そのうち、かんがい 16500×10³t、農地防災 7,400×10³t）が整備され、大日川第二発電所で最大 13 t/s を発電用水として利用した後、最大 1.86t/s の水量を加賀三湖導水路から木場潟に注水し、農業用水に利用する計画となっている。

2.2.4 近年発生した豪雨被害の実態

本地区周辺では豪雨によって度々水害が引き起こされてきた（国土交通省北陸地方整備局，2015）^[48]。加賀三湖土地改良区によると、近年では 1998 年 9 月 21～23 日（AMeDAS 小松地点で最大 3 日雨量約 109mm）、2004 年 10 月 19～21 日（同、約 169mm）、また 2006 年 7 月 16～18 日（約 334mm）の豪雨イベント時に、地区内の水位観測点で氾濫危険水位を超えるなど、危険な状態になったことが聞きとれた。このうち 2006 年の豪雨は活発な梅雨前線の影響で発生し、平成 18 年 7 月豪雨と命名され全国各地で大きな被害をもたらした。本地区内では、柴山潟内の水位観測点である片山津で計画高水位である 1.67m（石川県土木部河川課，2007）^[28]を超過し、最大では約 1.87m に達した。さらに柴山潟から水が溢れ周辺の片山津温泉街や水田で浸水被害が発生するなど（Fig. 2.5）、記憶に残る大災害となった。また隣県である新潟県でも、2004 年、2011 年と立て続けに最大で数百年確率規模にもなる記録的豪雨が発生した（それぞれ、平成 16 年 7 月新潟・福島豪雨、平成 23 年 7 月新潟・福島豪雨）。2004 年は新潟県内を流れる五十嵐川、刈谷田川などで河川堤防が複数ヶ所決壊し甚大な浸水被害となったが、一方でこのような大災害時においても、農業水利施設が災害復旧に役立った事例として示された（増本ら，2009）^[63]。また 2011 年時には、2004 年の豪雨被害を教訓にして刈谷田川沿いに整備された遊水地群が機能し、大きな洪水ピークカット効果を発揮して下流域の洪水リスク軽減に役立ったことから、上流域から下流域までを一体として考える流域管理の重要性が証明された事例となった。



Fig. 2.5 2006年7月16～18日に発生した豪雨時の柴山瀉と周辺の浸水被害の様子
(北國新聞2006年7月18日付朝刊より抜粋)^[23]

2.3 解析資料の特徴と豪雨イベントの抽出

2.3.1 長期間の実測降雨データの収集

本研究で対象とした加賀三湖地区の付近には、いくつかの AMeDAS (小松, 加賀菅谷, 白山河内など) が設置されている。しかし, AMeDAS では設置から現在までのデータ蓄積が約 40 年分となる。そこで, さらに長期間の降雨データを収集し豪雨を分析するために, この対象地区の近傍で長期間の気象資料が現存する金沢地方気象台を選定し (対象地区より北東へ約 35km の地点), そこでの気象台帳及び気象庁ホームページより, 時間雨量データが存在する 1940 年 1 月から 2008 年 12 月までの 69 年間の気象資料を収集した。収集した資料は上記期間の日雨量及び時間雨量である。

後述するように, 収集資料より抽出した豪雨イベントは時間雨量 (72 時間) に分割し, 1 時間単位でその特性を分析した。分析結果については **Table 2.1** ならびに **Table 2.2** で示す期間・時期毎に比較し, 観測期間内の過去から現在までの変化傾向を明らかにした。

Table 2.1 実測資料データの期間

Period	Name
1940～1962	Period I
1963～1985	Period II
1986～2008	Period III

Table 2.2 実測資料の降雨発生時期

Month	Name
5 ～ 7	Rainy season
8 ～10	Typhoon season
11 ～ 1	Winter season

2.3.2 気候モデルによる予測データの収集と特徴

ここでは、気候変動の影響を受けた将来の予測降雨を分析するため、第5期の結合モデル相互比較プロジェクト（Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, 以後 CMIP5）（Taylor et al, 2012）^[17]より、複数 GCM（全球気候予測モデル, General Circulation Model）による降雨データを収集し活用した。CMIP5 には世界の約 30 の気候モデリンググループから多様な時間空間解像度を持つ GCM が多く参加しており、同様の気候変動シナリオ下での計算結果を相互に比較することで、炭素循環と雲に関連したフィードバック・メカニズムのモデル間差異、数十年の時間スケールでの気候変動の予測可能性に対する GCM の能力、類似した GCM 間で気候変動応答の幅が生成される理由等を評価するためのプロジェクトである。その GCM 群の中から本研究に用いる GCM データを収集する際に、全球から見ると比較的局所的なイベントである台風や極端豪雨の再現性を重視し、それらに関わる空間解像度が比較的小さい5つのモデルを選定した。Table 2.3 に、収集した GCM とその特徴を記す。

収集したデータは日雨量系列の気候シナリオである。ここで、GCM による計算初期のわずかな差異が最終的に大きな影響をもたらす可能性があるため（気象現象のカオス性）、同モデルによって初期値を変更し、同じ期間を計算した結果であるアンサンブルメンバー（各モデルで1～3シナリオ）を収集した。さらに将来期間については、複数の代表的濃度経路（Representative Concentration Pathways, RCP）シナリオに基づく予測データがあり、ここでは収集した将来期間のメンバーのすべてについて RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 の3シナリオに基づく結果を収集・分析した。RCP シナリオは放射強制力に関係する温室効果ガス濃度やエアロゾル量の変化経路を定めており、数値が大きいほど放射強制力が大きいシナリオとなる。ここで収集した RCP2.6 は 2100 年までに放射強制力がピークを迎えその後減少する低位安定化シナリオ、RCP8.5 は 2100 年以降も放射強制力の上昇が続く高位参照シナリオ、RCP4.5 はそれらの中間にあり、2100 年以降に安定する中位安定化シナリオである（Moss et al, 2010）^[14]。この結果、収集した気候シナリオ数は現在期間で 15 シナリオ、将来期間で合計 33 シナリオ（11 シナリオ×3つの RCP シナリオ）となった。

ここで、GCM データは日雨量単位であるため、将来の時間雨量の強度変化やその降雨波形（時間集中度）といった降雨パターンの変化は評価できない。そこで、地域気象モデル Weather Research and

Table 2.3 収集した GCM データの特徴

Name of GCM	Development country	Data resolution (degrees)	Data duration (year)	Ensemble members		Collected scenario
				Present	Future projection	
CNRM-CM5	France	1.406×1.406		3	1	
CSIRO-Mk3-6-0	Australia	1.875×1.875	Present: 1970-2005	3	3	RCP2.6
HadGEM2-ES	The United Kingdom	1.875×1.241	Future projection: 2016-2100	3	3	RCP4.5
MIROC5	Japan	1.406×1.406		3	3	RCP8.5
MRI-CGCM3	Japan	1.125×1.125		3	1	

Forecasting Mode (以下, WRF) による現在と将来の時間単位雨量の出力を分析し, その変化傾向も調べた. WRF による領域気候の計算には, 境界条件として GCM による出力を利用する. ここでは, 上記の収集データのうち MIROC5 による現在と RCP4.5 及び RCP8.5 シナリオ下での将来についてそれぞれ 1 つの気候シナリオを用いて計算した工藤ら (2015) ^[55]の結果を援用した. データ期間は現在期間が 1981~2000 年, 将来期間が 2081~2100 年の各 20 年間であり, それぞれの期間中の梅雨期 (6 月 1 日から 8 月 10 日までの 70 日間) のみを対象としている.

2.3.3 気候モデルデータの処理法と切出し範囲

Fig. 2.6 に, GCMs および WRF のデータ範囲とその近傍にある AMeDAS 地点を示す. 前述のように GCM のオリジナルデータの空間解像度は 100km 以上と粗いため, ここではオリジナルデータを日本周辺で 5km メッシュ間隔に空間的にダウンスケールした工藤ら (2016) ^[56]のデータから対象地区周辺の結果を切り出して使用した. そのダウンスケール法は, 該当メッシュ周辺の GCM 計算点を 4 点抽出し, その点までの距離の逆数を重みとして使用する逆距離内挿法を採用している. ここで, 一般的に GCM 出力の雨量値には系統誤差であるバイアスが存在しており, 観測値と同様に各種分析に用いるためにはその補正が必要となる. その補正法として, 実測値と GCM 出力値の確率分布関数を作成しその分布を一致させる CDF 法 (Ines and Hansen, 2006) ^[27]を適用し, ここでは日雨量の確率分布関数にガンマ分布を利用している. また, 比較に用いる観測値は各メッシュから最寄りの観測点 (気象官署, AMeDAS 等) を 3 点選定し, 上記の逆距離内挿法を適用した. その際, 豪雨のような極端現象に対する補正精度を高めるため, 各月で最大の日雨量については別途抽出し, Gumbel 分布を適用した

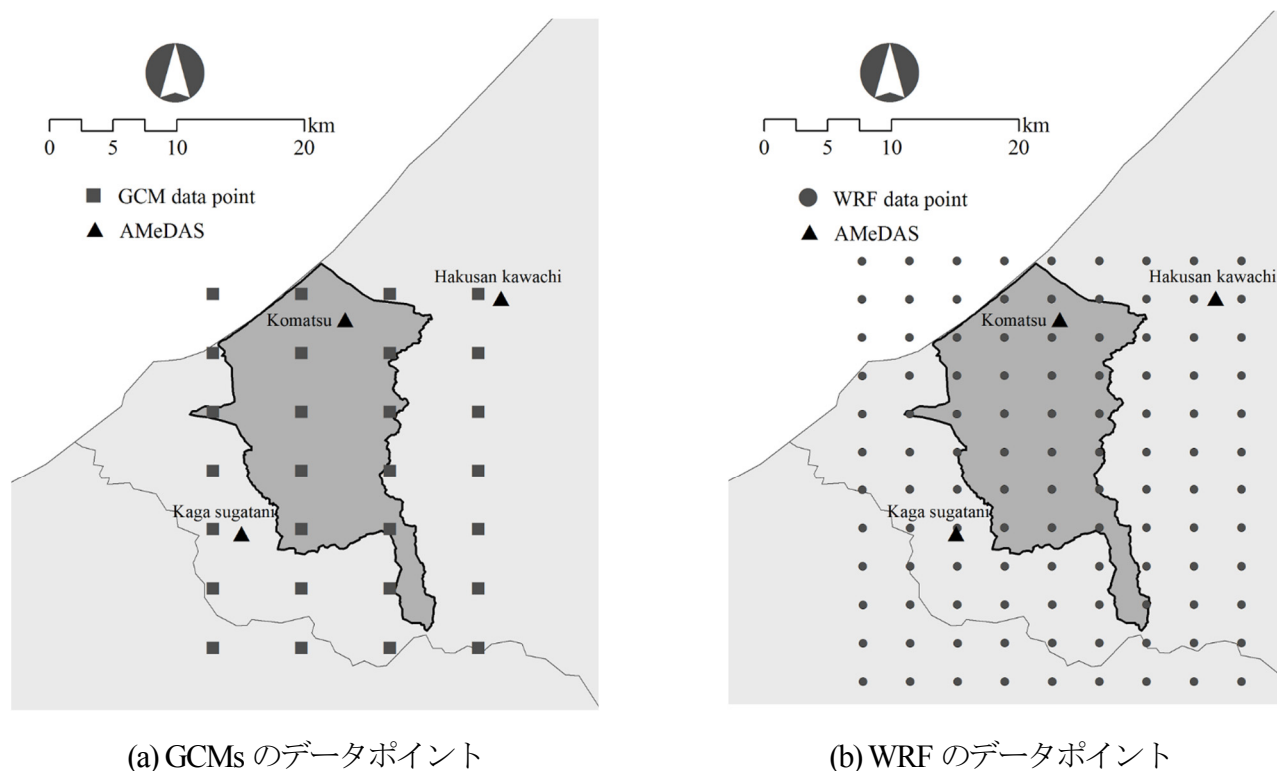


Fig. 2.6 GCMs および WRF のデータ範囲

Table 2.4 GCM データの分析のための設定期間

Year	Period name	(Abbreviation)
1981～2005	Present	(-)
2026～2050	Near Future	(NearF)
2051～2075	Middle of 21st century	(Mid21C)
2076～2100	End of 21st century	(End21C)

補正法を併用した（工藤ら，2012）^[53]。この気候モデルデータは，現在から将来にかけての降雨の変動傾向を分析するため，Table 2.4 のように現在を1期間，将来を3期間に分割した。データ期間はいずれも25年間であり，計算点の雨量値を平均した流域平均雨量を分析に用いた。

また，力学的ダウンスケール法である WRF の出力値は，領域の境界条件になる GCM データについてはバイアス補正の必要があるものの，領域内部の出力については補正の必要はない。しかし，WRF に実装されている雲微物理スキームは降雨の再現性に関わるため，対象地区に合う適切なスキームを選択する必要がある。ここで使用するデータは，複数のスキームを用いた結果を AMeDAS 地点の実測値およびメッシュ気候値 2010 のデータと比較しこの地域に最も適したものを選択しており，豪雨特性の再現性は十分に検証されている（工藤ら，2015）^[55]。

2.3.4 豪雨イベントの抽出

本研究で取り扱う豪雨イベントは降雨期間を3日間と固定し、日雨量にある閾値を設けてイベントを抽出した。閾値は自由に設定できるが、ここでは対象地域における年に1~2回程度の豪雨抽出を目安に、①日雨量70mm以上もしくは、②3日雨量100mm以上の降雨イベントを閾値に採用し、この2つの条件のいずれかを満たす最大3日雨量を豪雨イベントとして抽出した。なお、①と②の閾値により同じ豪雨イベントが重複して抽出される可能性もあるが、ここでは重複がないように配慮した。抽出した豪雨イベントについては、実測値では資料から時間雨量(72時間)に分割し、1時間単位でも分析した。なおWRFの出力についてはデータ期間が限られるため、豪雨イベントを抽出するのではなく期間中(6月1日から8月10日までの70日間)の時間雨量の連続値を一つの系列として扱うこととした。

2.4 適用結果と考察

2.4.1 実測の降雨資料からみた豪雨特性

前述の閾値により抽出した豪雨イベントは、69年間で197個であった。Fig. 2.7に、豪雨の各年の抽出回数を示す。この69年間で、最高で年に9回もの豪雨が観測されている年もあったが(1965年および1985年)、発生がない年もあり、年平均の豪雨発生回数では約2.8回という結果になった。また、月毎の豪雨発生頻度をみると、この地域では1年のうち2, 3, 4月には条件を満たす豪雨が発生しておらず、5月から豪雨の発生頻度が上昇し、特に7月および9月に発生頻度が高い傾向にあることが

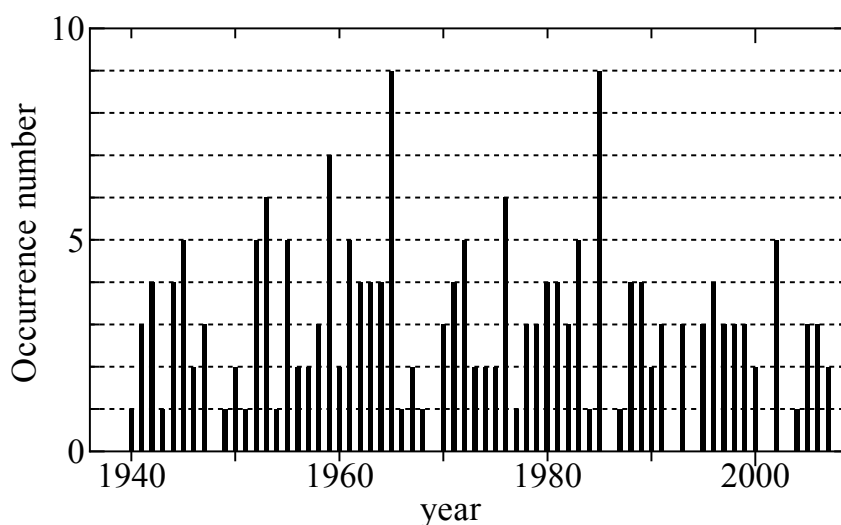


Fig. 2.7 各年の実測豪雨の抽出回数

分かった。6月と8月は、7月と9月に比べると発生頻度がやや低かった。分割期間毎にみると、Ⅲ期ではⅠ期およびⅡ期に比べ9・11月の発生割合が高くなっていた。

それをⅠ～Ⅲ期の期間ならびに発生時期毎に分割し、時間雨量を用いて相互に比較した。分析は、各豪雨イベント（72時間）中の最大1・3・6・12・24・48時間雨量の値や、時間雨量の発生頻度等について行った。なお、全期間を通じ、72時間雨量中の最大48時間雨量は平均でその9割以上を占めていることから、本研究では最大48時間雨量までの分析を行うこととした。分析結果についてはTable 2.1ならびにTable 2.2で示した期間・時期毎に比較し、過去から現在までの変化傾向を分析した。

2.4.1.1 期間毎の豪雨発生回数と抽出雨量

Table 2.5に、発生期間および分割期間毎の豪雨イベント中の各最大時間雨量の平均値およびそれぞれのⅠ期に対する割合を示す。Ⅰ～Ⅲ期の変化をみると、豪雨イベント発生回数についてはⅡ期が78回と最も多く、Ⅲ期が50回と最も少なかった。また豪雨時の各継続時間雨量の平均値では、最大1時間雨量については同じかやや減少していた。しかし、最大3時間雨量の平均値についてはⅠ期からⅡ～Ⅲ期と進むに従い1%程度の微増となり、最大6・12・24・48時間雨量は3～9%増加していた。特にⅢ期では、最大6・12・24時間雨量の増加割合がⅠ期と比較した平均値として8～9%高かった。これにより、金沢において、過去から現在までのある閾値を超えるような豪雨の発生回数については明確な増加傾向は見られないものの、1回の豪雨イベント時の降水量にみる平均値が徐々に増加傾向にあることが示唆された。

2.4.1.2 発生時期毎の豪雨発生回数と抽出雨量

豪雨イベントを発生月により冬期（11～1月）、梅雨期（5～7月）、台風期（8～10月）に分類し、それぞれの発生時期について豪雨の発生傾向をみる（Table 2.6）。豪雨の発生回数は梅雨期・台風期に多く、全体の約8割を占めていた。冬期にも抽出基準を満たす豪雨が発生しているが、発生回数は少ない。また、月毎の豪雨発生頻度をみると、この地域では1年のうち2・3・4月には豪雨が発生しておらず、5月から豪雨の発生頻度が上昇し、特に7月および9月に発生頻度が高い傾向にあることが分かった。6月と8月は7月と9月に比べると発生頻度がやや低かった。分割期間毎にみると、Ⅲ期ではⅠ期およびⅡ期に比べ、9・11月の発生割合が高くなっていた。

次に、発生時期と分割期間毎に抽出された雨量の平均値については、冬期は梅雨期と台風期と比べ最大1時間雨量が平均値で半分程度と小さくなっている。しかし、Ⅲ期ではⅠ～Ⅱ期と比べ冬期の雨量平均値が明らかに増加しており、この傾向が継続すれば将来的に冬期でも激しい豪雨の発生が懸念される。一方、梅雨期と台風期では、抽出雨量の平均値は同程度であったが、最大1時間雨量は台風期の方がやや大きい。また、梅雨期はⅡ期で平均値としての各継続雨量が最も大きく、Ⅲ期ではⅠ期

Table 2.5 期間別の豪雨発生回数（回）と継続時間毎の雨量平均値（mm）

Period	No. of events	1-h max. (mm)	3-h max. (mm)	6-h max. (mm)	12-h max. (mm)	24-h max. (mm)	48-h max. (mm)	72-h max. (mm)
Period I	69	20.6	38.7	52.6	70	91.8	118.9	128.7
Period II	78	19.7	39.3	55.5	75.1	97.2	122.6	136.2
Period III	50	20	39.1	56.9	76.1	99.2	123.4	133.3

Table 2.6 時期毎の豪雨発生回数（回）と継続時間毎の雨量平均値(mm)

Season	Period	No. of events	1-h max. (mm)	3-h max. (mm)	6-h max. (mm)	12-h max. (mm)	24-h max. (mm)	48-h max. (mm)	72-h max. (mm)
Winter season	Period I	14	7.6	16.6	26.6	42.3	65.9	100.5	121.9
	Period II	15	9.7	20.9	30.8	46.2	66.2	100.6	118.7
	Period III	9	11.7	23.8	35.3	55.1	86.1	125.9	140.9
Rainy season	Period I	24	21.3	41.5	57.7	76.1	95.9	122.5	127.0
	Period II	29	21.3	43.9	62.9	85.7	109.1	132.1	150.0
	Period III	20	21.0	40.4	59.4	79.3	100.7	119.4	130.5
Typhoon season	Period I	30	26.0	46.6	60.8	78.3	99.8	123.6	132.5
	Period II	34	22.8	43.4	60.2	78.8	100.7	124.3	132.2
	Period III	21	22.8	44.5	64.2	82.8	104.7	127.9	134.5

に比べると最大6・12・24時間雨量でやや増加しているものの、最大48時間雨量ではやや減少していた。台風期には、Ⅲ期で最大6・12・24・48時間雨量の平均値が最も大きく変化し、増加傾向がみられた。将来的には台風勢力の強大化も予測されていることから、今後台風期の豪雨の総雨量および時間雨量の変化傾向に注目していく必要がある。

2.4.1.3 最大48時間雨量にみる時間雨量の発生頻度

分割期間毎に最大48時間雨量中の1時間雨量の発生頻度をみると（**Fig.2.8**）、Ⅰ～Ⅲ期で10mm未満の時間雨量の発生頻度には大きな差はなかった。また、Ⅲ期には10～15mmおよび20～30mmの時間雨量の発生頻度がやや増加しているものの、それ以上の大きな時間雨量は必ずしも増加していない一方で、30mm以上の時間雨量ではⅠ期が最も発生頻度が高かった。

次に、将来的に増加の可能性の懸念がある台風期の豪雨について、最大48時間雨量中における1時間雨量の発生頻度を調べると、Ⅰ期からⅡ～Ⅲ期になるにつれて10mm～15mmよりやや増加し始め、

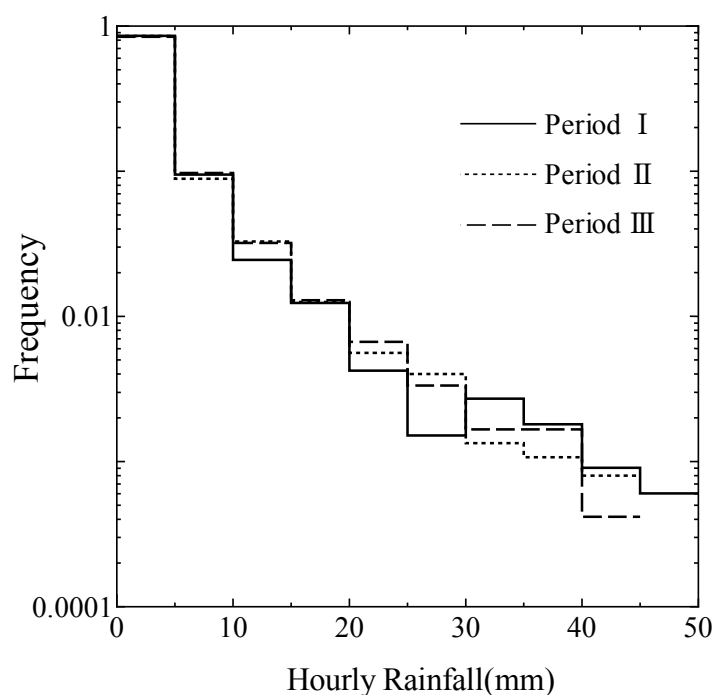


Fig. 2.8 期間毎の最大48時間雨量中の1時間雨量の発生頻度

Ⅲ期では20~35mmの発生頻度も上昇していた。一方、35mm以上ではⅠ期の発生頻度が高いことが分かった。これらのことから、金沢の台風期における豪雨イベントでは、豪雨の中で強度が中間程度の時間雨量の発生頻度が上昇しているといえる。

2.4.1.4 最大6時間雨量の発生頻度とその強度変化

短時間雨量の発生傾向をみるため、Ⅰ~Ⅲ期で雨量の平均値が約8%増加している最大6時間雨量に注目し、その発生頻度の変化について考察した。Fig. 2.9に各期間の最大6時間雨量の発生頻度を示す。同図より、金沢においては最大6時間雨量のほとんどが20mm~100mm程度の範囲にあることが分かる。最大値はⅡ期に見られた約147mmであった。期間毎の発生頻度では、発生頻度のピークがⅠ期は20~29.9mmおよび30~39.9mm(同値)、Ⅱ期では30~39.9mm、にあったが、Ⅲ期になると40~49.9mmとなっていた。これにより、発生頻度のピークが徐々に高いほうに移動していることが分かった。また、80mm/6h以上のような強い雨量では特に増加傾向は確認できなかった。このように、豪雨中の最大6時間雨量については、Ⅰ~Ⅲ期で大きい雨量が増加したのではなく、40~79.9mmの中間程度の強度の豪雨イベントが多く発生していたことが分かった。

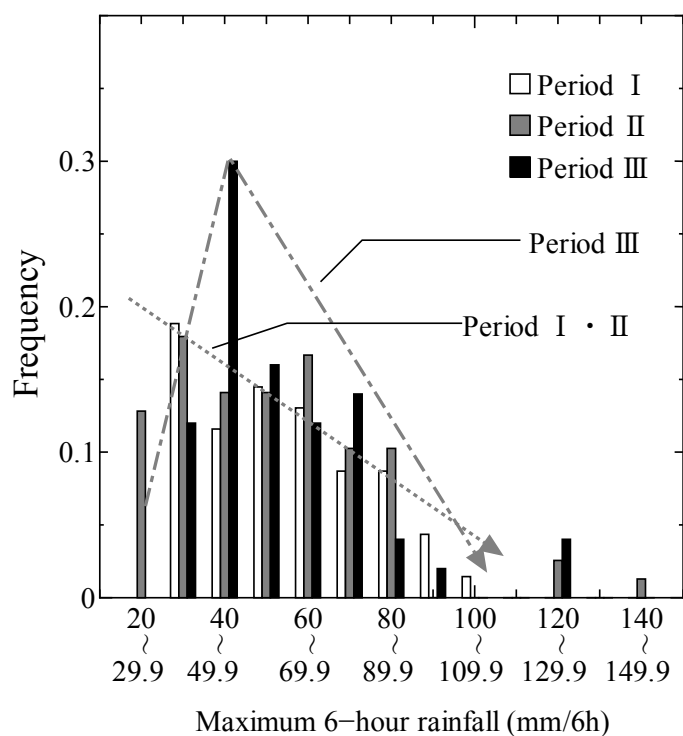


Fig. 2.9 最大6時間雨量の発生頻度

2.4.2 気候モデルにみる豪雨特性の将来変化

2.4.2.1 現在期間のGCM出力値と観測値の比較

Fig. 2.10のように、GCMによる現在期間の月平均降水量と、AMeDAS地点での平年値(1981~2010年)(小松, 白山河内, 加賀菅谷の平均)を比較した。図より、GCMのデータでも降水量が冬季に多い対象地域の気候特性が捉えられており、さらに各月の雨量も観測値をよく再現できていることが示された。一方で、図中のエラーバーで表したようにGCMの出力は気候シナリオによって結果に幅があり、気候変動予測の不確実性が示された。その幅は、冬季と比較して夏季でやや大きい傾向にある。

さらに、設定した閾値によって抽出した現在期間の豪雨イベントの特性を調べた。まず豪雨の年発生頻度を見ると、GCMでは平均で約2.98個の豪雨が抽出された。これは、実測値の値(約2.83個)とほぼ同じとなっていた。さらに月毎に発生頻度を見ていくと(Fig. 2.11)、GCMデータの平均では梅雨や台風の影響がある6月から9月に発生個数が多く、冬季にも僅かに豪雨が発生するなど。図中に破線で示した観測値の結果を良く表せていた。しかし同時に、この結果は月降水量の場合と同様に気候シナリオ毎に大きな幅があり、不確実性が大きいことが示された。

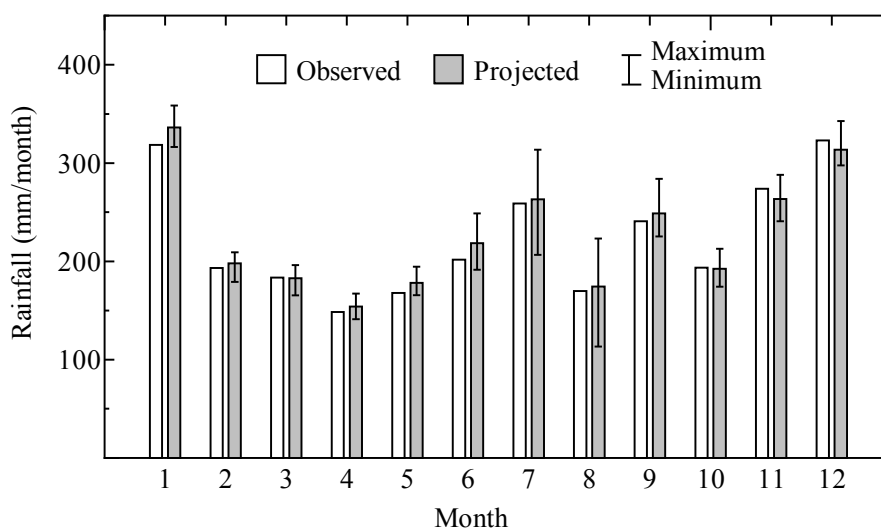


Fig. 2.10 対象地区周辺における実測と GCM の現在期間の月降水量の比較

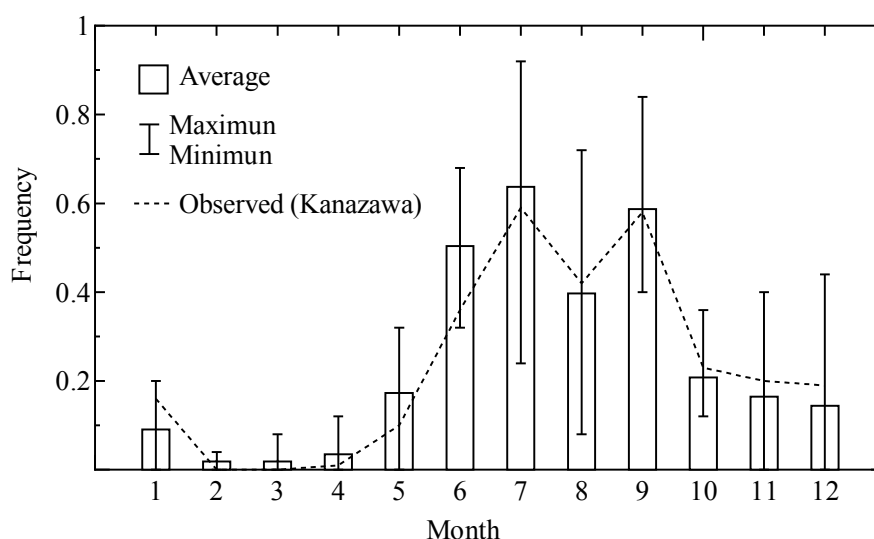


Fig. 2.11 GCM の現在期間にみる月毎の豪雨発生頻度

このように、収集した GCM の気候シナリオはバイアス補正の適用によって対象地区の実測降雨特性を再現できていることが分かった。またこのデータ処理により、豪雨イベントも実測と同様に発生していることが確認されたため、これらのデータの分析結果を対象地区における現在から将来の気候変化の一例として活用することが可能と考えられる。一方で、GCM の予測値はモデルの種類や計算初期値の影響を受けその結果が大きく異なることが明らかになったため、種々の解析に使用する際には、その予測に見る不確実性も併せて提示することが肝要といえる。

2.4.2.2 豪雨の出現頻度と雨量強度の将来変化

次に、GCMの将来期間のデータより **Table 2.4** に示す期間に分けて豪雨イベントを抽出し、現在期間の結果と比較して豪雨特性の将来変化を見た。まず、各月で抽出されたイベント数（収集した気候シナリオの平均値）を現在期間からの変化割合のRCPシナリオ別に見ると（**Table 2.7**），将来期間はほとんどの月、期間で豪雨は増加傾向にあり、さらに期間が将来になるにつれ、またRCPシナリオが2.6から8.5へと高位になるに従い発生個数が多くなることが分かった。水田へ影響を与える灌漑期間に注目すると、作付け直後の時期である5～6月では1.02倍から最大で2.64倍（RCP8.5における21世紀末の5月）、出穂時期となる7～8月では一部で豪雨数が減少している結果もあるものの最大で1.31倍となり、収穫時期となる9～10月では1.02～1.36倍であった。これにより、現在期間と比較して将来は、豪雨の発生頻度が明確に増加したことにより水田被害のリスクが上昇すると予想され、何らかの対応策をとる必要性が高まると考えられた。なお、月別に見ると1～4月での変化割合が特に高くなっているが、これはもともとの発生数が少ないことが影響している。

次に、豪雨の雨量特性を比較するため、抽出されたイベントの雨量平均値とその変動係数（Coefficient of variation, C.V.）を分析した。ここで変動係数とは、それぞれのデータにおいて標準偏差を平均値で除した係数であり、平均値が異なるデータ系列間でのバラツキの程度を比較する指標となる。この両者をそれぞれのデータ期間で求めると **Fig. 2.12** が得られた。まず現在期間では豪雨量と変動係数の平均値が136.9mmおよび0.295という結果であるのに対し、全ての将来期間で両値が増加していた。その両方が最も高かったのはRCP8.5における21世紀末の期間であり、雨量値は平均で145.2mm（現在期間から約6%の増加）、変動係数は0.382となった。この両値をRCPシナリオ別にみるとその変化傾向は異なっており、低位シナリオであるRCP2.6では21世紀半ばまでは雨量値と変動係数が共に増加しているが、21世紀末にかけて減少していた。中位シナリオのRCP4.5でも21世紀半ばから21世紀末にかけて豪雨量が減少していたが、値自体はRCP2.6より高く、さらに変動係数は単調増加していることから、将来的には極端規模の豪雨の発生が懸念される。一方RCP8.5の結果では、雨量平均値と変動係数が21世紀末まで共に単調増加していた。また変動係数は収集した11の気候シナリオ間での予測幅が小さく、安定して高い結果であることが分かった。

これらの結果に見るように、GCMによる将来予測値では、気候シナリオ、あるいはRCPシナリオによって気候変動の度合いが異なっており、現在期間での結果と同様に不確実性を孕んでいることが明らかとなった。しかしどの結果を見ても、将来期間では現在よりも豪雨イベントの発生頻度と雨量強度、その変動係数の増加が見られたため、将来的にこの地区では豪雨による水害リスクが上昇する可能性は高いと考えられる。

Table 2.7 GCMにおける現在期間からみた将来期間の豪雨発生頻度の変化割合
(収集シナリオの平均値で比較した結果、網掛けは減少している箇所)

RCP scenario	Period	Month												Total
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
RCP2.6	NearF	1.44	0.78	2.73	1.36	1.55	1.20	1.18	0.88	1.19	1.05	1.03	1.62	1.19
	Mid21C	1.28	1.56	3.12	2.41	1.70	1.02	1.07	1.08	1.05	1.05	1.65	1.52	1.19
	End21C	1.64	0.78	3.12	1.89	1.91	1.18	1.23	1.13	1.03	1.15	1.65	1.84	1.29
RCP4.5	NearF	1.28	0.97	2.34	2.20	1.22	1.20	1.16	0.78	1.02	1.08	1.36	1.41	1.13
	Mid21C	1.80	1.36	3.70	2.10	1.62	1.26	1.26	0.97	1.17	1.05	1.91	1.82	1.31
	End21C	2.05	2.14	4.68	2.83	1.80	1.23	1.25	1.03	1.21	1.36	2.05	1.99	1.40
RCP8.5	NearF	1.12	1.17	2.34	3.25	1.47	1.21	1.05	1.13	1.04	1.07	1.52	1.52	1.20
	Mid21C	2.09	1.95	3.90	3.78	1.78	1.28	1.31	1.17	1.18	1.19	1.54	2.37	1.42
	End21C	2.73	3.51	5.26	4.93	2.64	1.45	1.16	1.09	1.28	1.43	1.61	2.07	1.53

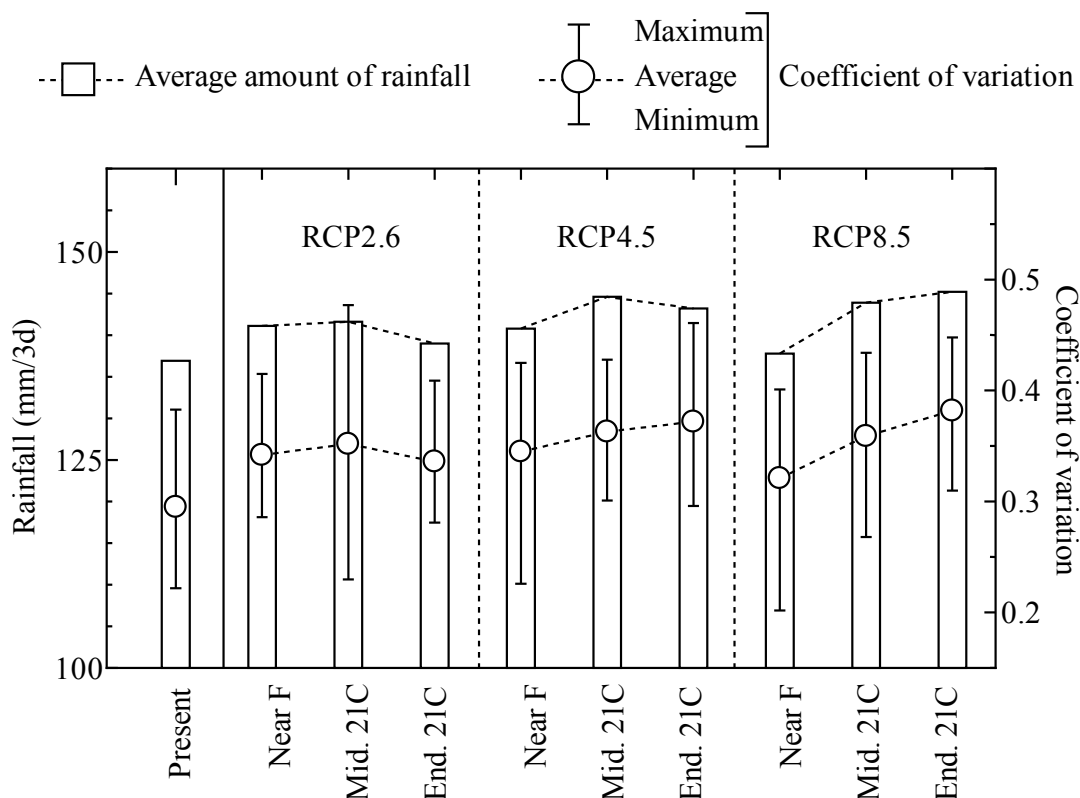


Fig. 2.12 GCM 出力にみる抽出豪雨の雨量平均値と変動係数の変化

2.4.2.3 WRF 出力にみる時間雨量強度の将来変化

次に、WRFによって計算した時間単位雨量の強度についての将来変化を見た。結果は計算点毎に出力されるためその空間分布を見ることもできるが、ここでは対象流域内にある AMeDAS の小松地点に注目し、**Fig. 2.6**に表示した WRF 計算点の中からそこに最寄りの計算点データを抽出し、時間雨量強度をみた。データ期間である20年間の70日分（6月1日～8月10日）の時間雨量の強度分布を現在期間と将来期間のそれぞれで見るとともに、各年の最大3, 6, 12, 24時間雨量を抽出し年最大値の強度を比較することで、短時間への降雨集中度合いの変化を分析した。

まず時間雨量の強度分布では、どの期間でも無効雨時間が全体の9割程度を占めていたものの、現在期間と比較して RCP4.5, 8.5 の将来の結果は共に強度の高い雨量の発生頻度が上昇していた。特に20年間の最大時間雨量では、現在期間では最大で45mm/hであったのに対し、RCP4.5では52mm/h、RCP8.5では56mm/hとなっており、将来は雨量強度の特性が変化する可能性が示された。さらに**Fig. 2.13(a)~(d)**に示す各短時間雨量の最大値の比較では、将来期間は現在と比較してより大きい雨量が出現していることが明らかになった。この傾向は RCP4.5 と RCP8.5 の結果の間では大きな違いはないものの、最大値を見ると3時間と6時間では RCP8.5 の方がより強度が高く、12時間と24時間では RCP4.5 の方がやや高い。この短時間雨量の強度は降雨の時間集中度とも関連しており、将来は短時間により降雨が集中することで降雨波形特性にも変化が見られ、豪雨による災害リスクにも影響を及ぼす可能性が高いと考えられた。

このように、将来は GCM データに見られる豪雨の頻度や雨量強度の増加に加え、降雨期間中の雨量集中度が高まる傾向が示れた。一方で、豪雨イベント時であってもその雨量強度は領域内で空間的に分布していることは実際の観測データからも周知であり、豪雨災害の発生には雨量強度に加えこの空間分布も影響を及ぼす可能性がある。そのため、本来は豪雨量の時空間分布の両方の影響を考慮した防災計画を検討する必要がある。しかし現状の計画基準では時間分布のみが検討項目となっており、この空間分布までは考慮されていないため、将来的にはこの影響を評価し、必要に応じて計画手法を更新していくことも残された課題といえる。

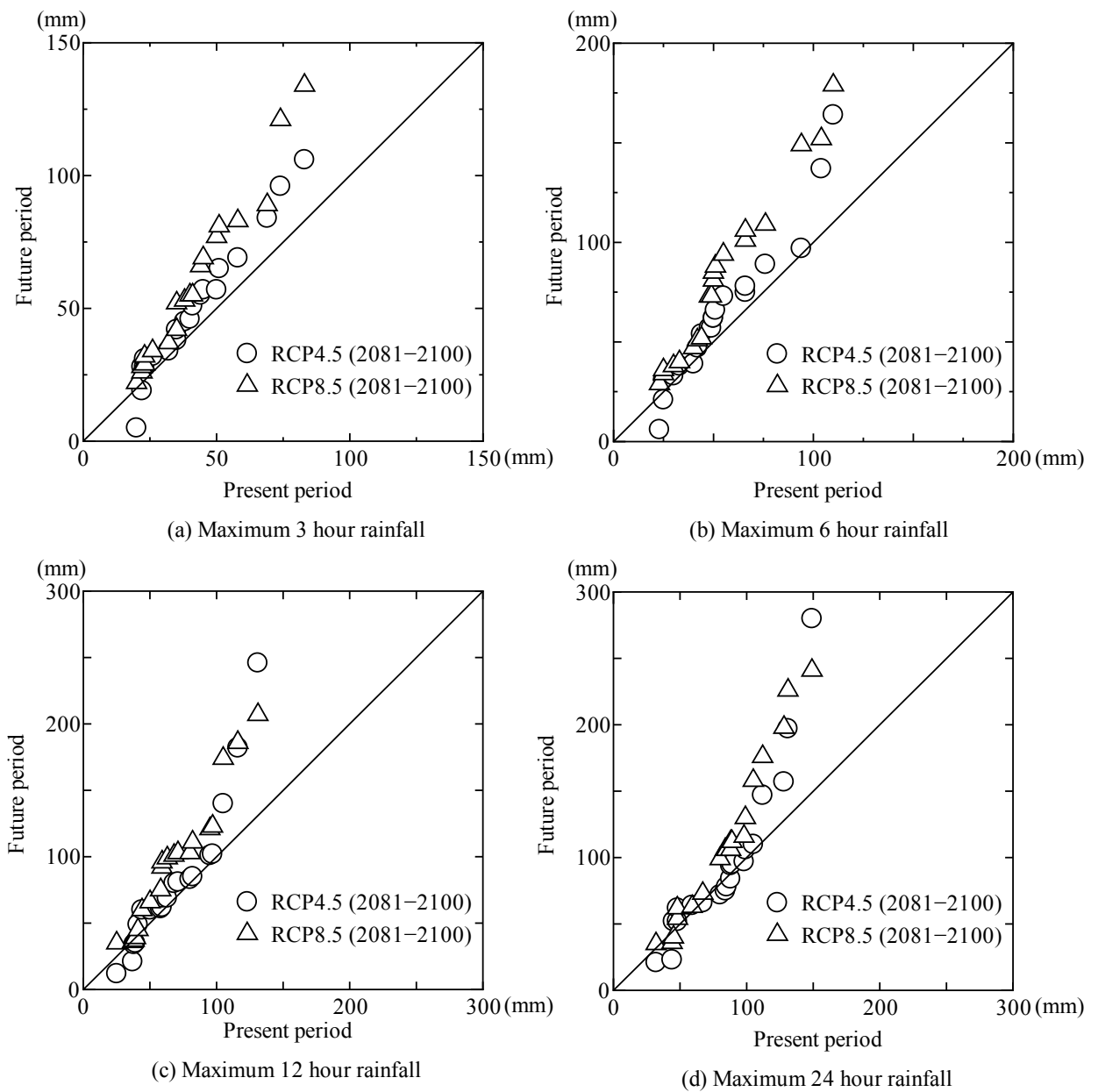


Fig. 2.13 WRF 出力にみる現在に対する将来期間の各最大雨量の増加傾向

2.5 本章のまとめ

対象地区近傍で観測された過去 69 年間の降水データから日雨量 70mm 以上または 3 日雨量 100mm 以上の豪雨イベントを抽出し、その変化傾向について期間および時期毎に分析・比較するとともに、気候モデルによる現在と将来の予測値から豪雨の将来変化傾向を明らかにした。得られた結果は以下の様である。

- 1) 対象地区の石川県加賀三湖地区では、豪雨イベントの発生回数は明確な変化傾向はみいだせないが、豪雨イベント内の最大 6・12・24・48 時間雨量の平均値についてはやや増加傾向にある。さらに、同じく実測値から時期毎に傾向をみると、特に台風時期にあたる 8~10 月に発生した豪雨は雨量平均値が徐々に増加していることが分かった。
- 2) 実測された全ての豪雨イベントの時間雨量の発生頻度をみると、20~35mm の頻度は上昇していたが、それ以上の強度の時間雨量は特に増加していなかった。すなわち、これまでの観測データからは、異常な強雨強度には必ずしも変化がみられないが、中間的な強い降雨が増加したということが分かった。
- 3) 実測豪雨の最大 6 時間雨量では、過去から現在にかけて発生頻度のピークは徐々に大きい値に移動していた。また、6 時間雨量中の 1 位と 2~6 位の 1 時間雨量の割合をみると、1 位の雨量は特に変化はないが 2 位以下の 1 時間雨量が相対的に増加したことが、全体雨量の増加した原因と考えられた。
- 4) 収集した気候モデルの出力を実測値と比較すると、バイアス補正によって全体的には月降水量と豪雨発生頻度の特性が再現され、対象地区での将来予測への利用にむけて適用性が示された。一方で、それぞれの気候シナリオの間には結果に大きなバラツキがみられ、気候予測にみる不確実性の存在が明らかになった。
- 5) すべての RCP シナリオにおいて、現在及び将来期間の気候シナリオから豪雨を抽出し比較すると、豪雨の発生頻度と豪雨量は共に将来的に増加する傾向がみられた。さらに変動係数も増加しており、将来的には極端な規模の豪雨が発生する危険性が高まるといえる。これらの傾向は、より高位の RCP シナリオであるほど、また期間が 21 世紀末になるほど強く表れていた。
- 6) さらに、GCM の出力を短時間単位の雨量へダウンスケールした WRF の出力より、短時間の雨量強度が増して集中的になる結果が現れた。これにより、将来この地域では雨量規模の変化に加え降雨波形パターンについても特性が変化する可能性が示された。これにより、対象地区では将来の豪雨災害のリスク上昇が懸念された。

第3章

地域降雨特性を考慮した短時間豪雨の模擬発生法のモデル化

3.1 はじめに

大規模豪雨に対する防災計画の策定に用いる計画基準の豪雨規模は、計画対象により経済性を考慮した上で概ね定められており、例えば農地を対象とする排水計画では10年確率程度の雨量が用いられる。ところが、計画基準雨量を時間配分した計画降雨波形については、パターンの多様さと複雑さから明確な基準設定には至っていない。その定義方法として複数の降雨強度式を組み合わせる手法(角屋ら, 1993)^[35]や確率論的に定式化を試みた事例(端野, 1986; 端野・前, 1990)^[13, 14]などが提案されているものの、現状では、過去の観測豪雨の実績波形あるいは降雨強度式を用いて定められた仮定的な波形を1つ設定し、妥当性を吟味したうえで採用している(農林水産省農村振興局, 2006)^[87]。豪雨時は、雨量の時間分布で表わされるハイエトグラフ形状(以下、内部波形)により出水規模やその特性が異なるため、安全性検討のためにはなるべく多くの波形パターンを想定するべきではあるが、限られた実測資料だけで十分な議論を行うことは困難である。

このような中、実測では得られない長期間、あるいは多数の降雨データを得るための有力な手段として、その模擬発生手法が多く提案されてきた。実測の降雨特性を備えた模擬発生データは実際に解析の入力としても使用されており(例えば角屋ら, 1970; 藤原・久井, 1986)^[30, 11]、実測値の代替として十分実用的といえる。ここで、降雨強度の分布形状はいくつかの確率分布によって近似できることが経験的に知られており、雨量値の模擬発生では、その中から実測値によく適合する分布を選択して使用するのが一般的である。しかし、1時間単位のような短時間スケールの雨量系列を得ようとする場合には、降雨強度に加えて内部波形の持つ自己相関性の再現が重要となり、そこには何らかの工夫が求められる。Woolhiser and Osborn (1985)^[125]や Hershenhorn and Woolhiser (1987)^[21]は日内の一雨雨量を短時間へ配分する手法を提案したが、そこでは配分期間中の雨量増分をマルコフ連鎖で表現した。また、自己回帰モデルを利用して前後の時間雨量値の相関性を考慮する手法や(藤原・久井, 1986; 佐山ら, 2008)^[11, 100]、ランダムカスケードモデルにより雨量の空間分布まで考慮した例(立川ら, 2003)^[106]もあるが、これらはいずれも雨量の配分手法に注目したものであり、無数に存在しうる内部波形の発生を目的としたものではない。また、観測数の少ない豪雨について、様々な雨量および内部波形パターンを効率的に模擬発生させることができれば、降雨データ蓄積の少ない地域への適用や防災関連の課題検討の入力とするなど幅広い活用が期待される。

そこで本章では、ある一定以上の雨量規模を持つ豪雨に的を絞り、その長時間雨量分布と内部波形の模擬発生手法を新たに提案する。最終的に得られるデータは1時間等の短時間単位であり、対象地区の実測豪雨特性を統計的に備えるよう工夫を行うことで、長・短時間雨量の豪雨波形の入力を必要とする様々な検討への活用が可能となる。

3.2 豪雨の模擬発生法の全体像

3.2.1 模擬発生手順の概要

本模擬発生手法はモンテカルロ法に基づいており、再現させる実測豪雨の特性は、発生頻度、日・時間単位の降雨強度分布および内部波形等とする。これらの地域による変化特性は、対象とする地区の実測豪雨データを事前に収集・分析し、各手順で必要なパラメータを推定することで組み込みが可能である。データの発生年数や個数は自由に設定でき、実測あるいは気候予測モデル等による推定では得られない長期間に対象地区で発生しうる多数の豪雨パターンを得ることができる。

本手法は、大きく **Fig. 3.1** に示す STEP1~4 の4手順で構成されており、さらに豪雨イベント回数および雨量規模の発生法 (STEP1~3) と、内部波形パターンの形成手法 (STEP4) に分類できる。まず STEP1 では、発生開始1年目の1月から順番に、1ヵ月毎の豪雨発生回数を決定する。発生回数が0回の場合はSTEP1に戻り、次月へ進む。豪雨が1回以上発生する場合はSTEP2に進み、発生した豪雨回数分の総雨量を日雨量単位で発生させ雨量規模を決定する。豪雨の降雨期間は、データ使用目的に応じて1日から数日程度の範囲で予め設定しておくこととし、例えばここでは排水計画の計画基準降雨で採用されることの多い3日雨量に固定する(農林水産省農村振興局, 2006)^[87]。この総雨量はSTEP3においてそれぞれ時間配分され、配分結果は無降雨を含む1時間雨量の系列となる。その際、配分結果の降雨強度分布が実測と適合するようにパラメータを決定する。すべての発生雨量を1時間単位に配分し終わるとSTEP1に戻り、次月に進んで同手順を繰り返す。一連の手順は設定した発生年数の最終年の12月が終わるまで繰り返され、その後STEP4に進む。

最終手順となるSTEP4では、発生したそれぞれの豪雨の内部波形パターンを形成する。この波形パターンは、しばしば単峰、複峰型のようなピークの数や、前方~後方集中型といったその位置に注目して分類されるが(例えば田中, 1972)^[111]、本手法では無数に想定されるパターンを得るため、これらについて恣意的な制約を設けない。再現すべき内部波形特性のうち、短時間降雨の強度分布についてはSTEP3で考慮済みであるから、ここでは自己相関特性の再現を目的とする。その手段として、配分された1時間雨量値を、相関を考慮しながら並べ替える手法を提案する。このようにして降雨強度の決定と自己相関性の補正を2段階に分けて行うことで、両特性を同時に満たす内部波形を得ることができ、発生したすべての豪雨の内部波形を得ると模擬発生手順が終了となる。なお本手法を構成す

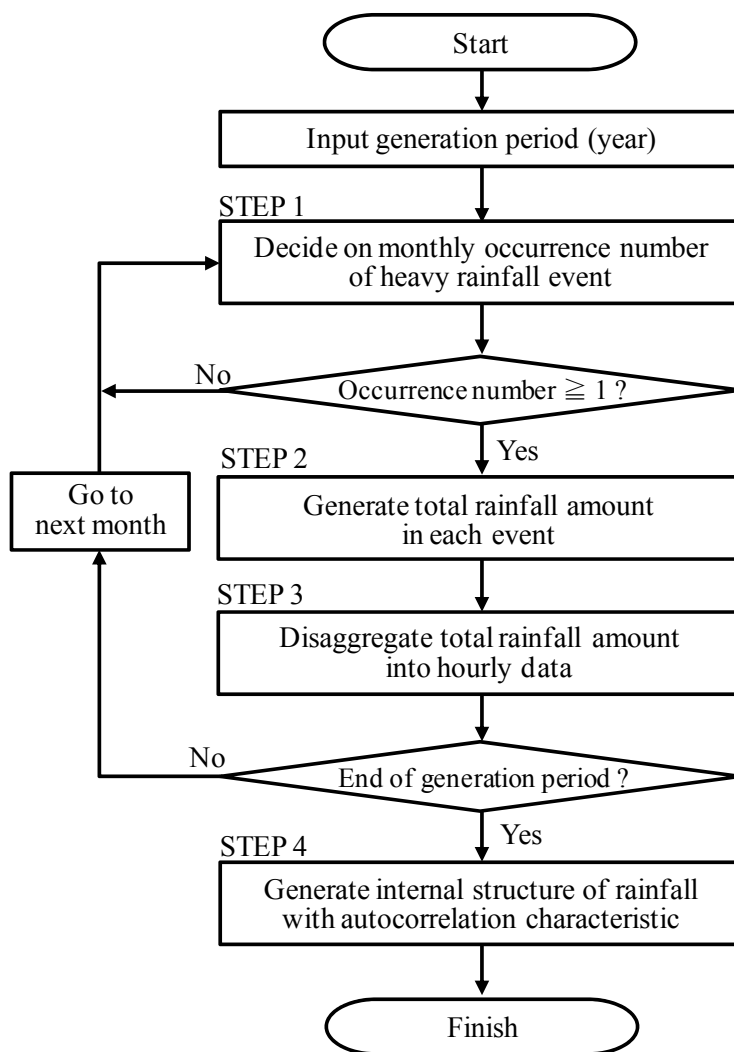


Fig. 3.1 豪雨の模擬発生手順の概要

る4つの手順はいずれも独立しており、発生回数や雨量規模に任意の値を設定することも可能である。

3.2.2 実測豪雨データの特徴

Fig. 3.1 に示す本模擬発生手法の各手順の詳細は後述するが、各手順に必要なパラメータは、対象とする地点の実測降雨資料より抽出した豪雨イベントより決定する。豪雨の降雨期間は模擬発生の対象データと同期間に設定し（ここでは3日間）、さらに雨量にある閾値を設けてそれを超えるイベントを豪雨として抽出する。この閾値には、収集した降雨資料の分析結果等を用いて対象地域毎に適当な値を採用するが、例えばその地域において年に2~3回発生する程度の雨量規模などが一つの目安となる（皆川・増本, 2010）^[68]。

3.3 豪雨発生回数および雨量規模の決定手法

以下に、本模擬発生法のうち **Fig. 3.1** の STEP1~3 で示される豪雨の発生回数およびそれぞれの雨量決定手順の詳細を述べる。なお、これ以降に示す関数 f は確率密度関数を、同様に関数 F は確率の累積分布関数を表すものとし、各分布に従う乱数は一様乱数を用いた逆関数法（例えば四辻, 2010）^[33]を採用して発生させた。

3.3.1 豪雨発生回数の決定手法

STEP1 では、1 ヶ月毎に豪雨の発生回数を決定していくことで、対象地区の豪雨発生の季節特性を再現させる。ここで、 j 月 ($j=1, 2, 3, \dots, 12$) の豪雨発生回数を n_j としたとき、この値がポアソン分布に従うと仮定すると、式 (3.1) が得られる (Ripley, 1987) ^[96]。

$$f(n_j) = \frac{e^{-\lambda_j y} (\lambda_j y)^{n_j}}{n_j!} \quad (3.1)$$

ここに、 λ_j は j 月の年平均の豪雨発生回数であり、各月で実測降雨資料より求めた値を用いる（例えば後述の **Table 3.1**）。日本では豪雨が発生する時期が梅雨時期と台風時期に集中しているが、 λ_j に実測資料より得た値を用いることで豪雨発生の季節性が表現される。ここで、 y は実測データの収集期間 (year) である。

この STEP1 においてある年の j 月の豪雨回数を決定する時、それが 1 回以上であった場合は STEP2 以降に進み、総雨量および 1 時間雨量への配分が順次行われる。発生回数が 0 回の場合は、次月である $j+1$ 月に進み (12 月の次は次年の 1 月)、再び STEP1 から開始する。

3.3.2 豪雨の雨量規模の発生手法

STEP2 では、STEP1 で発生した豪雨それぞれについて、総雨量（例えばここでは 3 日雨量に固定）を発生させる。総雨量は日雨量単位で扱うことから、その発生には日雨量の強度分布によく適合することが知られているガンマ分布を使用した。ここで用いたガンマ分布を式 (3.2) に示す (Johnson, 1987) ^[29]。

$$f(x) = \frac{a}{\Gamma(h)} [a(x-v)]^{h-1} e^{-a(x-v)} \quad (3.2)$$

ここに、 $\Gamma(h)$ はガンマ関数である。 v は原点パラメータであり、発生させる雨量の下限值として定められる。また、 h は形状母数、 a は尺度母数パラメータであり、ガンマ分布形状の決定に関わる。これらの値は抽出した実測豪雨の雨量平均値 m と分散 σ^2 を求めることで、以下の式 (3.3)、(3.4) により決定できる。

$$h = \frac{(m-v)^2}{\sigma^2} \quad (3.3)$$

$$a = \frac{m-v}{\sigma^2} \quad (3.4)$$

3.3.3 1時間雨量への配分割合の決定

STEP3 では、STEP2 で発生したそれぞれの総雨量を1時間雨量に配分する。降雨期間は3日としていたため、ここでの配分時間の総数 T は72となる。この1時間雨量値は、総雨量に各時間ステップの配分割合を乗じることで計算することとし、その値は次式 (3.5) で表わされる。

$$r_t = R \times d_t \quad (3.5)$$

ここで、添え字 t は総配分時間 T 中の時間ステップ ($t=1,2,3,\dots,T$) であり、 r_t は配分された各時間の雨量値である。 R は、STEP2 で決定したそれぞれの総雨量を入力するため、1イベント中では一定の値となる。 d_t は、総雨量を1とした時の雨量配分割合を示し、0から1の範囲でランダムに決定する。この値はそれぞれの時間ステップで異なる値をとり、その発生には自由度が高く様々な分布形状に適合可能なベータ分布を利用した (Bratley et al., 1987) [3]。以下にその手順を記す。

各時間ステップでの d_n 決定の行程は Fig. 3.2 のように示される。まず、総雨量の割合を1としたとき、時間ステップ1のときの配分割合 d_1 はベータ分布に従い得られる [0,1] の値とする。2ステップ目では、総雨量1から d_1 を除いた残りの値を1とみなし、同様にベータ分布に従い d_2 を決定する。3ステップ目は、1から前ステップまでの配分割合の合計を除いた残りの値に対し、同手順を繰り返す。この手順を最終時間ステップまで繰り返し、配分割合の積算値は必ず1とする。このとき、 t ステップ目の配分割合は式 (3.6) のように表現される。

$$d_t = \left(1 - \sum_{k=1}^{t-1} d_k \right) \times \beta_t \quad (3.6)$$

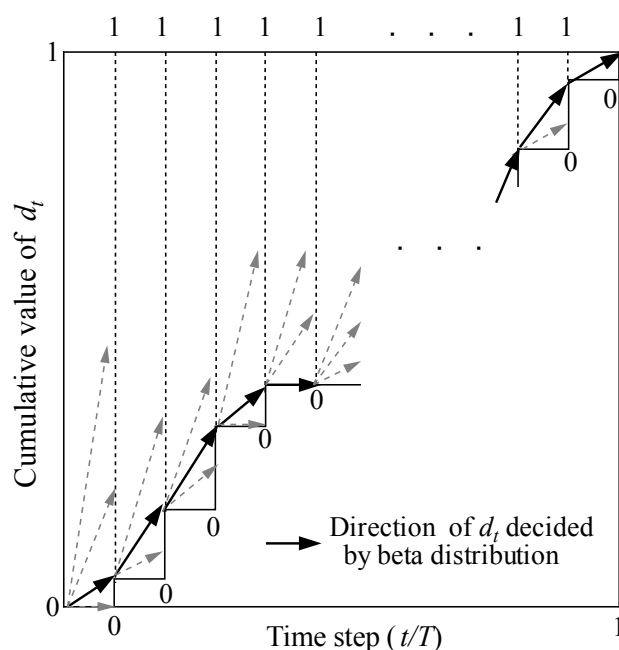


Fig. 3.2 各ステップの配分割合 d_n の決定手順
(T は総配分時間で、 $t=1, 2, \dots, T$)

式 (3.6) 中の β_i はベータ分布に従い得られる 0 から 1 の値であり、次式により得られる。

$$f(w) = \frac{\Gamma(a' + b')}{\Gamma(a')\Gamma(b')} w^{a'-1} (1-w)^{b'-1} \tag{3.7}$$

ここに、 w は一様乱数である。 a' 、 b' はそれぞれベータ分布の形状パラメータであり、得られる時間雨量の強度分布が実測に近い結果となるよう試行錯誤で決定する。ただし既往の研究より、ある程度の雨量規模を持つ豪雨であっても期間中の 1 時間雨量では無降雨あるいは 5 mm 未満などの強度の弱い雨量の発生割合が高く、その分布形状は指数分布で近似可能とされているため (増本, 1993) [59]、この両値はベータ分布がそのような形状をとる範囲で決定する。

3.4 内部波形パターンの模擬発生法

ここではまず、内部波形パターンの表示を容易にするために、各イベント中の経過時間およびその時の積算雨量を、それぞれ総時間数と総雨量で除して無次元化した積算雨量曲線を利用する。 Fig. 3.3 に本研究で抽出した実測豪雨 (後述の金沢地方気象台での観測値) の内部波形パターンを示すが、こ

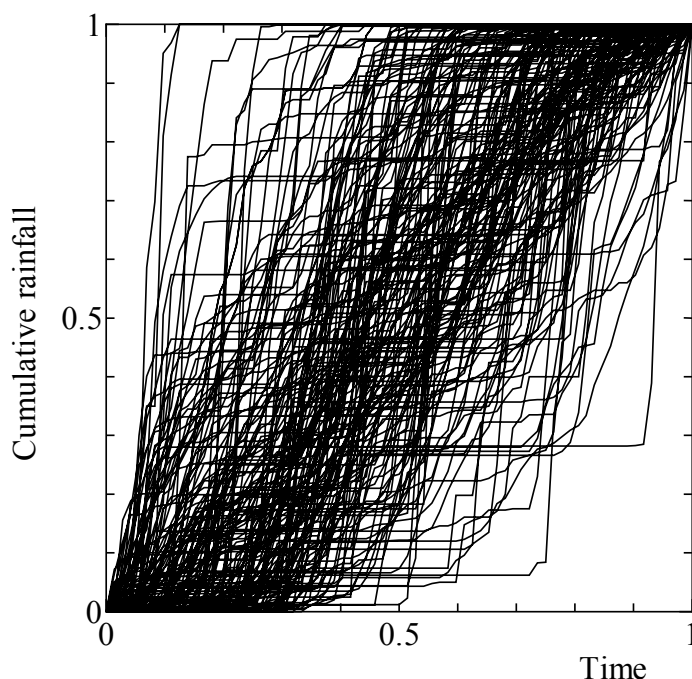


Fig. 3.3 無次元化された実測豪雨の内部波形パターン
(金沢地方気象台での例)

のように無次元化させることで総雨量が異なる多数の内部波形を並列して表示でき、そのパターンを容易に比較できる。STEP4では、模擬発生データ系列において内部波形の持つ自己相関性を補正すると同時に、この波形パターンの多様性を再現する手段として、STEP3で得た配分雨量値の並べ替えを実施する。その並び順を決定する基準として、前後の値で相関を持つ擬似の雨量値を新たに模擬発生させ利用する手法を提案する。

3.4.1 相関を持つ擬似雨量系列の模擬発生手法

擬似雨量値は模擬発生させる豪雨と同じ時間ステップ数とし、ここでは72個の値を発生させることになる。この値を x_i ($i=1, 2, 3, \dots, 72$) とすると、前述のように、豪雨中の1時間雨量の強度分布は指数分布で近似可能であることから、ここでは以下の式(3.8)、(3.9)に従い値を決定する。

$$\lambda = \frac{1}{\bar{x}} \quad (3.8)$$

$$F(x_i) = 1 - \exp(-\lambda x_i) \quad (3.9)$$

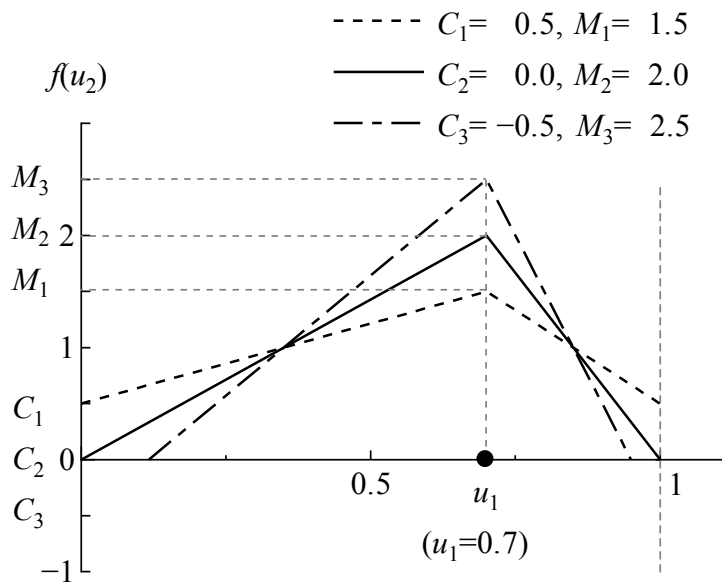


Fig. 3.4 パラメータ C , M による u_2 のとる分布形状の変化

式 (3.8) の \bar{x} は指数分布の尺度母数であり, 定義よりこの値は分布の期待値を表わす. ここでは STEP3 で配分された 1 時間雨量の平均値を入力しており, 並べ替えの対象となる系列毎に個別の値をとらせる. これにより, 擬似雨量値の発生に採用する指数分布の形状を, 並べ替えを行う系列の分布形状になるべく近似させるよう工夫している. この式を用いて, 以下の手順で擬似雨量値を模擬発生させる.

まず, $i=1$ のときの値 x_1 は, 並べ替えの対象となる 72 個の雨量値の中から無降雨を含めてランダムに 1 つ選択することとする. そのとき, 式 (3.9) より $F(x_1)=u_1$ とおくと, この値は $[0,1]$ の範囲をとることになる. 次に $i=2$ のときを考えると, ここで得る x_2 は x_1 との相関性を考慮する必要がある. そこで u_1 との相関性を考慮した u_2 の値を決定することで, 式 (3.10) により x_2 を求めることができる.

$$x_2 = -\frac{1}{\lambda} \ln(1-u_2) \tag{3.10}$$

u_2 の値は Fig. 3.4 に示すような u_1 を最頻値とする三角分布に従うと定義し, その中から決定することで u_1 との相関性を持たせる. このとき, u_2 がとる分布は u_1 との関係より以下の式 (3.11), (3.12) のように表わされる.

$$f(u_2) = \begin{cases} C + \frac{u_2(M-C)}{u_1} & 0 < u_2 \leq u_1 \\ M - \frac{u_2 - u_1}{1 - u_1}(M-C) & u_1 < u_2 < 1 \end{cases} \tag{3.11}$$

$$F(u_2) = \begin{cases} Cu_2 + \frac{u_2^2}{2u_1}(M-C) & 0 < u_2 \leq u_1 \\ Cu_1 + \frac{u_1^2}{2}(M-C) + \left[M + \frac{u_1}{1-u_1}(M-C) \right] (u_2 - u_1) \\ \quad - \left[\frac{M-C}{2(1-u_1)} \right] (u_2^2 - u_1^2) & u_1 < u_2 < 1 \end{cases} \quad (3.12)$$

ここで、図中の M と C はパラメータであり、両値の関係を式 (3.13) で定義する。

$$\left. \begin{array}{l} M = 2 - C \\ C \leq 1 \end{array} \right\} \quad (3.13)$$

パラメータ C は自由に設定でき、マイナスの値もとりうる。この値を調節することで u_2 が従う分布形状が変化し (Fig. 3.4), 同時に u_1 との相関強度も変動する (ここでは C が小さくなるほど相関度合いが強くなる)。また $C=1$ のときは $M=1$ となり, u_1 と u_2 は無相関となる。ただし, このパラメータは最終的に得られる豪雨データの自己相関係数が実測の値によく適合するように試行錯誤で決定する。このようにして決定された u_2 より得られる x_2 は, x_1 と近い値をとる確率が高く, 両値の相関関係が考慮されることとなる。3 ステップ目では, u_2 を最頻値とする式 (12) より u_3 を決定し, 同様の手法を用いて x_3 を得る。これを最終ステップまで繰り返すことで, 前後の値で相関性を備えた擬似雨量値から成る系列が得られる。

次に, この擬似雨量値を利用して STEP3 で得た配分雨量値を並べ替える手法について述べる。

3.4.2 短時間雨量値の並べ替えによる内部波形パターンの作成手法

短時間雨量値の並べ替えについて, ここでは 2 通りの手法を考案した。1 つ目は擬似雨量値を発生させた時間ステップ毎に STEP3 で配分された系列の中から雨量値を選択していく手法 (1 案) である。2 つ目は, 擬似雨量値を最終ステップまで連続して発生させた後に配分雨量値を並べ替える, すなわち擬似雨量値の系列が持つ連続した波形パターンを利用する並べ替え手法 (2 案) といえる。以下に各手順の詳細を記す。なお, 2 案は後述の適用段階において明らかになった 1 案の問題点を解決するための改良案の位置付けである。

3.4.2.1 雨量値の毎時間選択による内部波形の形成

1案では、3.4.1に示す手順で時間ステップ i のときの擬似雨量値 x_i が決定すると、その度にSTEP3で発生させた配分雨量系列の中から1つ雨量値を選択する。その選択手法は、 x_i と配分雨量値をすべて比較し、その絶対値が最も近い値を選ぶ。ここで選ばれた値は配分雨量の系列から除外していき、並べ替え後の時間ステップ i の雨量値とする。このように1つの値が選択されるとその値を x_i に置き換え、式(3.9)以降の手順で次ステップの値 x_{i+1} を決定し、再びそれに近い雨量値を1つ選択する。この手順をすべての時間ステップが終わるまで繰り返すと、配分雨量系列内で近い大きさの雨量値が固まって配置され、相関性が考慮された系列が得られる。この手法の特徴は、擬似雨量値 x_i が元の配分雨量値からのみ選ばれる点である。

3.4.2.2 擬似雨量系列の波形パターンを用いた並べ替え

2案では、3.4.1に示す手法によって最終ステップまで連続して擬似雨量値を発生させる。その後、得られた擬似雨量系列中の値の並びを波形パターンとして捉え、STEP3で得た配分雨量値の並べ替え処理を行う。その両者を関連付ける指標として、ここではそれぞれの系列中の値の大きさの順位並び(Rank)に注目する。Fig.3.5に、この並べ替え前後での内部波形パターン変化の模式図を示す。まず、参照される擬似雨量値(Quasi rainfall)に、元の位置情報としてそれぞれの配分時間ステップを記憶させておく。次に、擬似雨量系列と並べ替えの対象となる配分雨量系列(Disaggregated rainfall)のそれぞれで、雨量値を大きさの順にソートし順位付けを行う。その後、ソートされた両系列で同順位の値を対応させ、擬似雨量値の持つ元の位置情報を配分雨量値に移行させる。その位置情報に従って雨量値を並べ替えることで、両系列の順位並びが同じとなる。この手順により、降雨強度の異なる2つの系列で最大限に波形の形状パターンを近づけることができる。その結果、得られた並べ替え後の雨量系列(Rearranged rainfall)では大きさの近い雨量値が連続して抽出され(Fig.3.5 (b))、自己相関特性を備えた内部波形が形成されることとなる。ただし、この擬似雨量系列は、並べ替えを行う度に新たに発生させるため、その波形形状はすべて異なる。そのため、最終的に得られる並べ替え後の雨量系列はすべて異なる内部波形を持つこととなる。

これらの内部波形パターン生成手順が発生したすべての豪雨イベントに対して実行されると、提案する一連の模擬発生手法が終了となる。

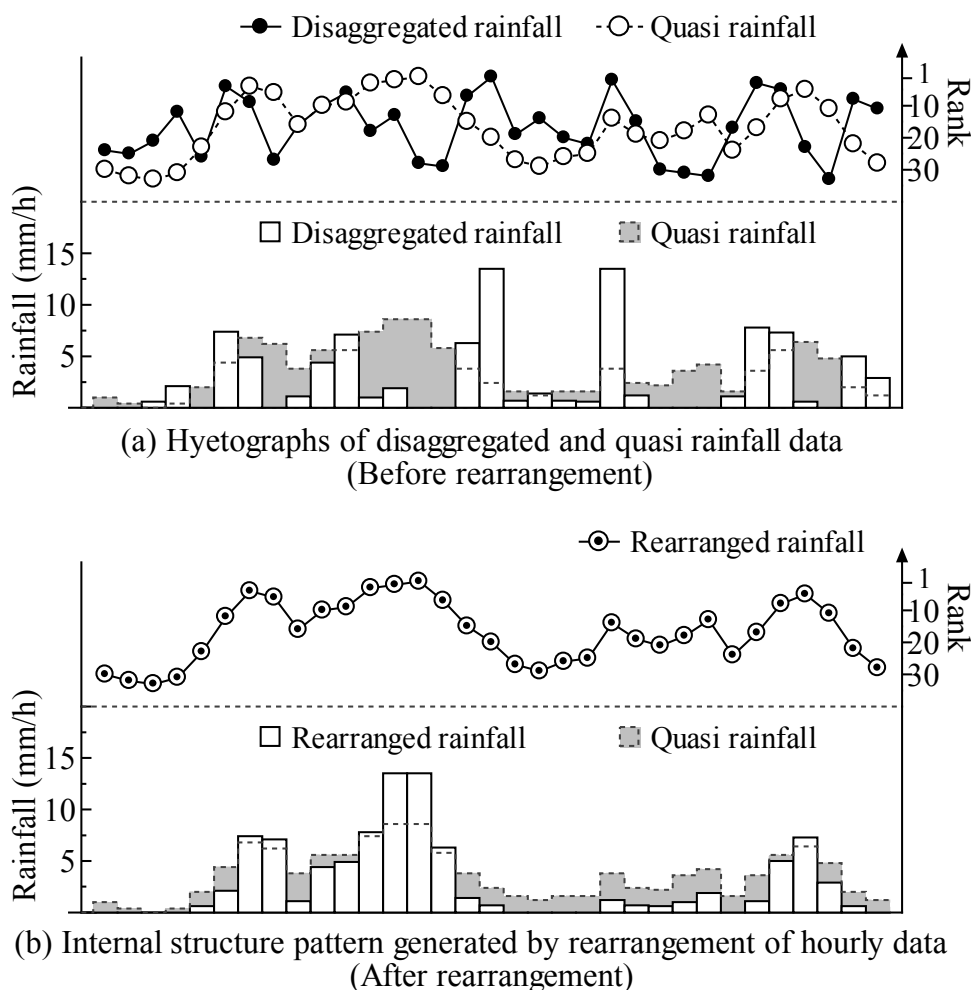


Fig. 3.5 雨量値の大きさの順位並びに注目した並べ替え

3.5 適用結果と考察

3.5.1 実測豪雨から得られたパラメータ

以上の手順で模擬発生させた豪雨データの各特性を、実測値と比較することで検証する。本研究では、各手順で必要となるパラメータの決定および結果の比較に、2章で収集・分析してきた金沢地方気象台の日雨量および時間雨量データを利用した。データ期間は、1時間雨量の観測記録が存在する1940年1月から2008年12月までの69年間である。豪雨抽出の閾値は日雨量70mm以上の日を含む3日雨量、もしくは3日雨量で100mmを超えるイベントと決定し、この閾値により合計で197個の豪雨を抽出した（両条件による重複抽出は無し）。これらより、STEP1における式(1)では $y=69$ となり、 j 月の年平均豪雨発生回数である n_j にはそれぞれTable 3.1の値を用いた。STEP2で使用するガンマ分布のパラメータは、豪雨抽出の閾値に合わせて $v=70.0$ とした。さらに、抽出豪雨の総雨量の平均

Table 3.1 実測資料より得た各月の年平均豪雨発生回数

Month	1	2	3	4	5	6
λ_j	0.159	0.000	0.000	0.014	0.101	0.362

Month	7	8	9	10	11	12
λ_j	0.594	0.420	0.580	0.232	0.203	0.188

Table 3.2 実測値より得たガンマ分布のパラメータ

ν	h	a
70	2.443	0.039

値 $m=132.8$, 分散 $\sigma^2=1,614.4$ からパラメータ h , a を Table 3.2 のように得た. また, STEP3 で配分割合の決定に用いたベータ分布では, その形状が指数分布形状をとるようにそれぞれのパラメータを $0 < a < 1$, $b > 1$ の範囲で制限し, 最終的に得られる1時間雨量の強度分布が実測とよく適合するように試行錯誤的に決定した. 本研究ではこの両パラメータは配分割合決定の時間ステップ t とともに変化することとし, a には 0.1 ($t=1$) から 0.8 ($t=72$) まで等間隔に単調増加させた値を各ステップで設定した. 同様に b には 15 から 1 まで等間隔で単調減少させた値を用いた.

ここでは模擬発生年数を 100 年と設定して得られたデータと実測値との比較結果を示す.

3.5.2 豪雨の発生頻度および雨量規模の再現性

STEP1 で決定された豪雨発生回数の合計は, 100 年間で 305 回となり, 年平均では 3.05 回, 1 年間では最大で 8 回の豪雨が発生していた. 実測資料では, 69 年間で 197 個の豪雨を抽出したことから年平均で 2.85 個 (年最大は 9 個) であり, ほぼ同等の頻度で模擬発生できていることになる. また各月の豪雨発生頻度をみるとこちらもよく再現できており (Fig. 3.6), 対象地区の豪雨発生の季節特性がよく表わしている. Fig. 3.7 に実測および模擬発生雨量の積算頻度分布を示す. この図より, 両系列の雨量規模の分布形状はよく適合しているといえる. さらに, STEP3 において総雨量を配分した時間雨量の強度分布は Fig. 3.8 のように示された. ここで使用した実測豪雨中の 1 時間雨量の強度は約 90% が 5 mm 以下であり, 例えば 30 mm 以上のような大きな雨量の発生割合は全体の 2~3% 程度と低いため, 図中の縦軸は対数軸として比較している. これより, 模擬発生豪雨中の 1 時間雨量は, 強度の弱い雨量と共に強い雨量においても実測の強度分布をよく再現しており, 本手法において豪雨の発生頻度とその降雨強度については地域特性を十分表現できているといえる.

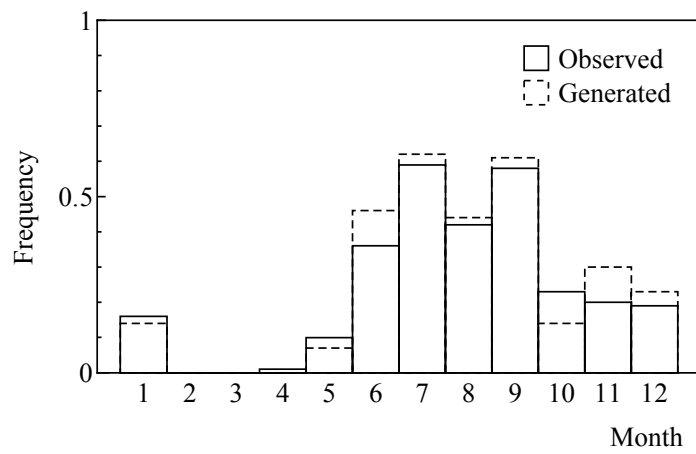


Fig. 3.6 実測および模擬発生による各月の豪雨の発生頻度

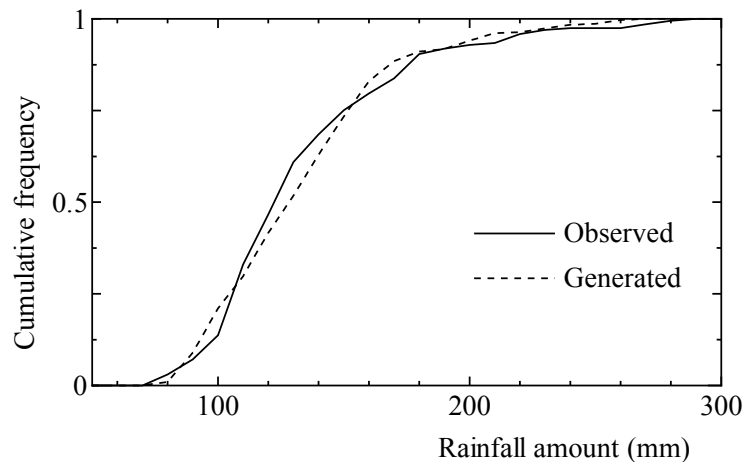


Fig. 3.7 実測および模擬発生による総雨量の積算頻度分布

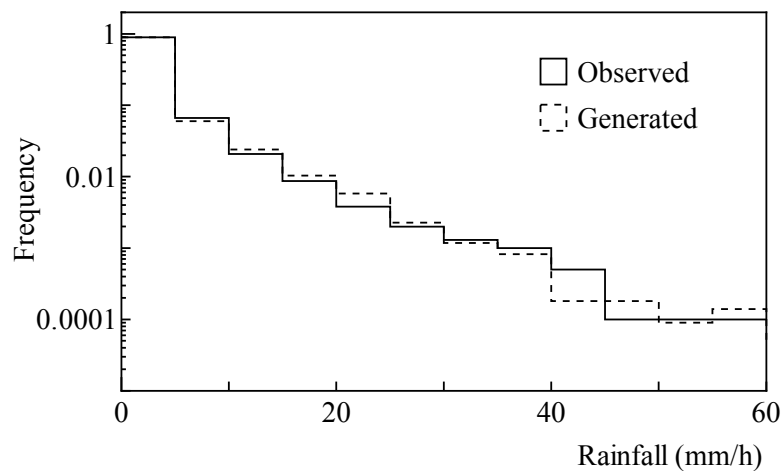


Fig. 3.8 実測および模擬発生による1時間雨量の発生分布

3.5.3 内部波形特性の再現性

次に、STEP4に示した2つの手法で模擬発生させた豪雨の内部波形特性を比較する。その検証では、本研究で考慮した自己相関性および、波形パターンの分布に注目する。まず自己相関性では、実測豪雨とSTEP4での雨量値の並べ替え処理前後の自己相関係数をそれぞれ求め比較することで、この並べ替え手法の効果を見る。自己相関係数は1イベント毎に当然異なるため、多数のイベントから成るデータセットでこの値を比較するには2通りの手段が考えられる。すなわち、自己相関係数を1イベント毎に個々に求め、全体を平均した値を代表値として比較に用いる方法と、すべてのイベントを連結して1つの長い雨量系列とみなし、その自己相関係数を求める方法である。その両方を試したところ、得られる値に大きな差異がないことが確認されたため、ここでは後者の手法を採用した結果を示す。

ここで N 時間分の雨量時系列データ x_t ($t=1, 2, 3, \dots, N$)について、遅れ時間を τ とした時の自己相関係数 $R(\tau)$ は次式で求められる。

$$R(\tau) = \frac{\sum_{t=1}^{N-\tau} x_t x_{t+\tau} - (N-\tau)\bar{x}_1\bar{x}_2}{\sqrt{\sum_{t=1}^{N-\tau} (x_t - \bar{x}_1)^2} \sqrt{\sum_{t=\tau+1}^N (x_t - \bar{x}_2)^2}} \quad (3.14)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} \bar{x}_1 &= \sum_{t=1}^{N-\tau} x_t / (N-\tau) \\ \bar{x}_2 &= \sum_{t=\tau+1}^N x_t / (N-\tau) \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

である。

以上の式により求めた、実測および模擬発生雨量系列のコレログラムをFig.3.9に示す。図より、遅れ時間を1とした時の自己相関係数 $R(1)$ に注目すると、実測豪雨では $R(1)=0.55$ であり相関性がみられるが、STEP3で配分された直後の並べ替え前の雨量系列 (Before rearrangement) は0.20程度であり、相関性を持たない。一方で、STEP4で並べ替え処理を行った後の系列をみると、1案では $R(1)=0.55$ 、2案で0.51となった。これより、配分雨量系列をそれぞれの手法で並べ替えた結果、実測豪雨に近い自己相関特性を持つ内部波形が再現できていることが示された。

次に、それぞれの手法で得た内部波形のパターン形状をFig.3.10で比較する。まず(a)に示した並べ替え前のパターン形状の分布では、前述の実測豪雨より得た結果 (Fig.3.3) と比べて幅がなく偏っていることが確認されたため、この偏りを解消する必要がある。そこで1案の手法で並べ替えたFig.3.10 (b) のパターンをみると、上記の偏りが解消されておらず、すべての事例において時間ステップ

の後半に雨量が集中する偏りが新たに発生した。この原因を精査すると、豪雨中の時間雨量分布では無降雨あるいは少雨の割合が全体のほとんど（ここでは約9割）を占めることが関係していることが明らかになった。すなわち、ある時間の並べ替え対象に発生頻度の大きい小さな雨量値を選択した場合、その値を用いて発生させる擬似雨量値も小さな値になる確率が高いため、その値と配分雨量値を逐一比較する1案の手順では再び小さな雨量値が選択される。この傾向が連鎖すると、ある時間ステップからは小さな雨量値のみが連続して選択されてしまい、その末尾に未選択の比較的大きな雨量値が集中する結果となる。このため、1案では内部波形の持つ自己相関性の再現は可能であるが、その波形パターンの偏りの解消までには至らないことが示された。

一方、2案による結果の Fig. 3.10 (c) では、実測豪雨と同様に雨量の集中する位置が降雨期間の前半から後半まで幅広く分布しており、降雨期間の前半、あるいは後半に雨量が集中するなど多彩な波形パターンが得られていることがみてとれる。これは、連続して発生させた擬似雨量系列中の値の大小関係のみを波形パターンとして利用したため、そのパターンはランダムであり且つ雨量の偏りが解消される結果となった。

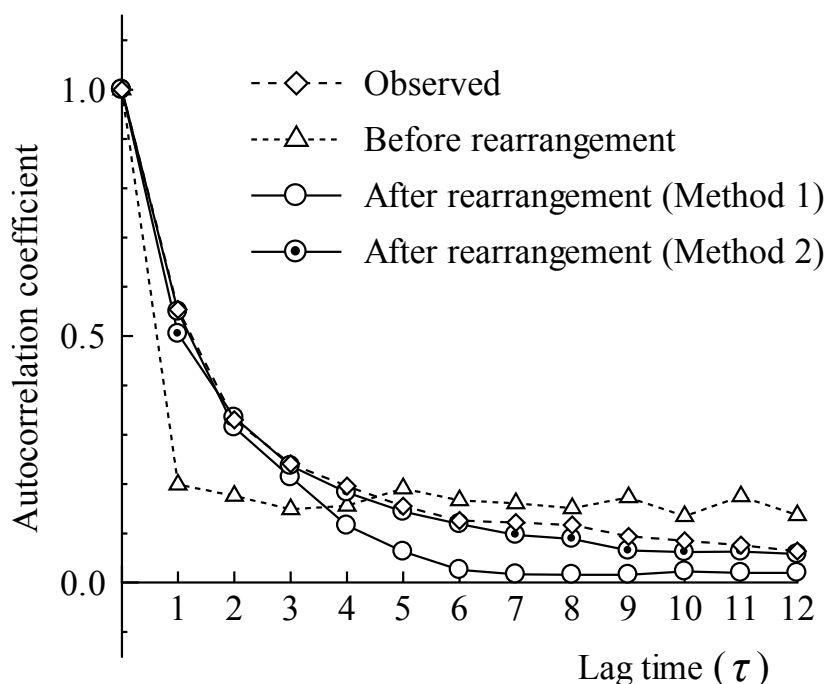
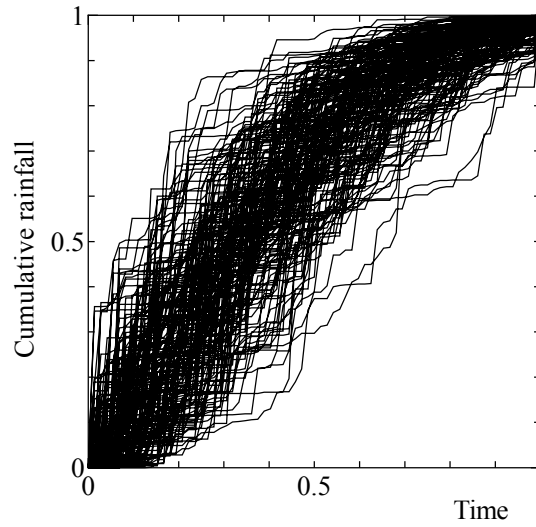
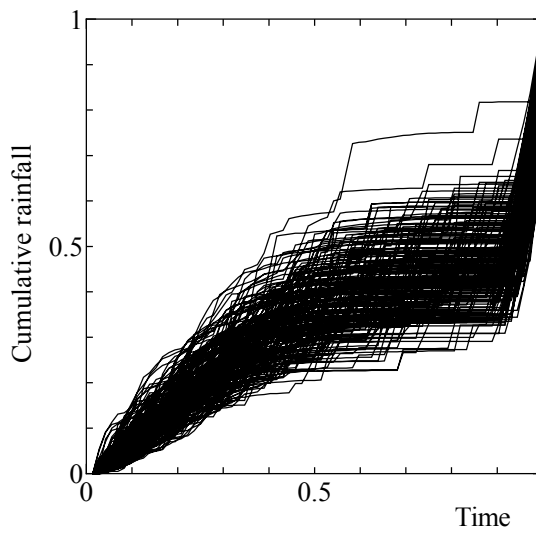


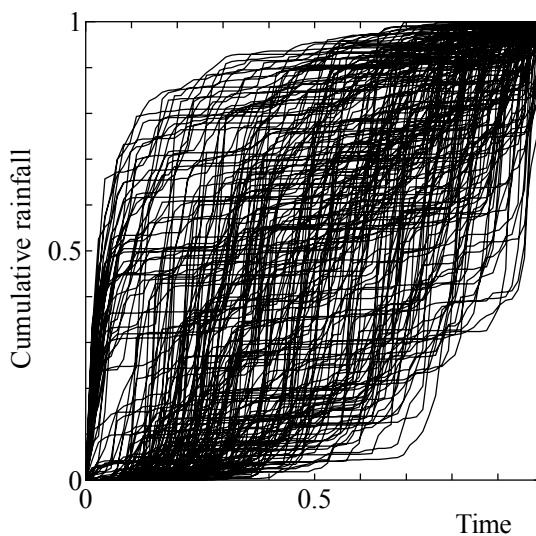
Fig. 3.9 実測および模擬発生雨量系列の自己相関係数



(a) Before rearrangement



(b) After rearrangement (Method 1)



(c) After rearrangement (Method 2)

Fig. 3.10 雨量値の並べ替えによる模擬発生豪雨の内部波形パターン

以上の検証より、2案を用いることでこれまで困難であった実測の豪雨が持つ自己相関性および波形パターンの多様性を同時に備えた内部波形を得ることが可能であることが示された。よって、ここで最終的に提示する模擬発生手法では、2案の内部波形発生法およびその結果を採用し、提案する。

3.5.4 豪雨の模擬発生結果と短時間最大雨量の強度分布

以上の手順で発生させた模擬発生豪雨のハイトグラフの一例を **Fig. 3.11** に示す。図より、降雨強度および内部波形パターンはそれぞれのデータで異なり、様々な結果が得られていることがわかる。さらに、豪雨中の短時間雨量の強度特性を実測と模擬発生豪雨で比較した。各イベントから降雨期間中の最大6, 12, 24, 48時間雨量を抽出しそれらの出現頻度を比較すると (**Fig. 3.12**)、全体的に模擬発生豪雨の方が大きい雨量の出現頻度がやや低いものの、概ね近い分布形状となっていた。このことから、本手法で1時間雨量の強度とその並びから成る内部波形特性を考慮した結果として、数時間～48時間等の短時間雨量の強度特性についても再現できていることが確認された。

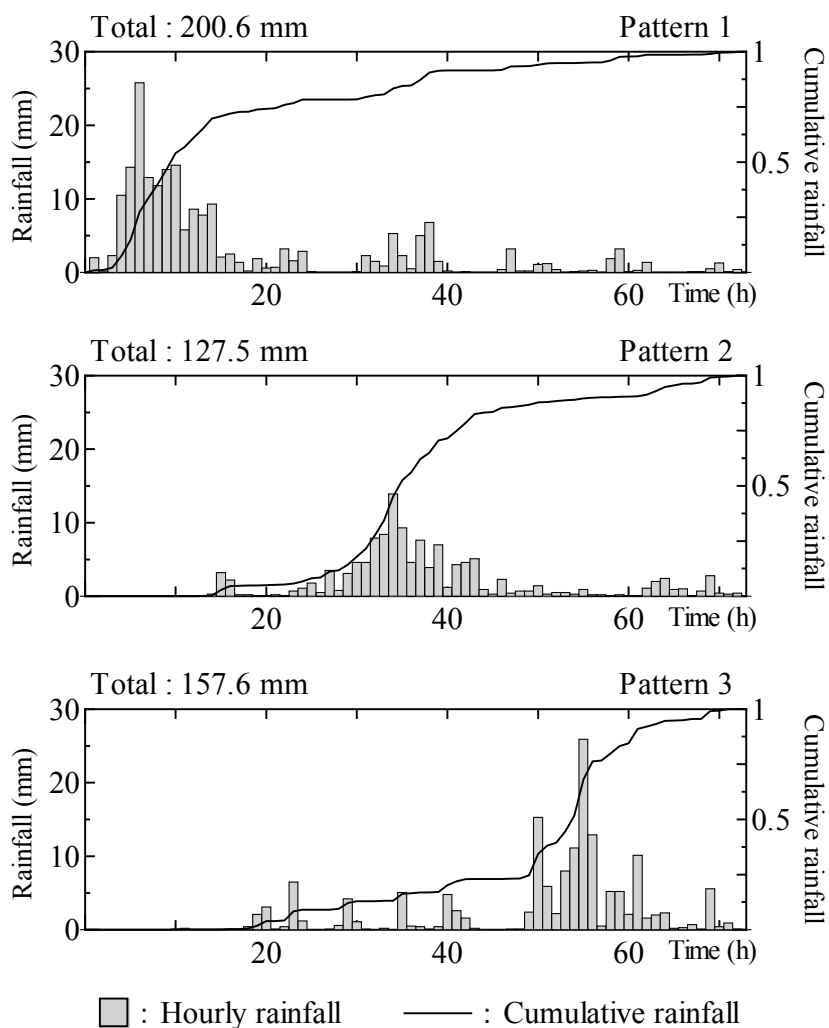


Fig. 3.11 模擬発生豪雨データの抽出例

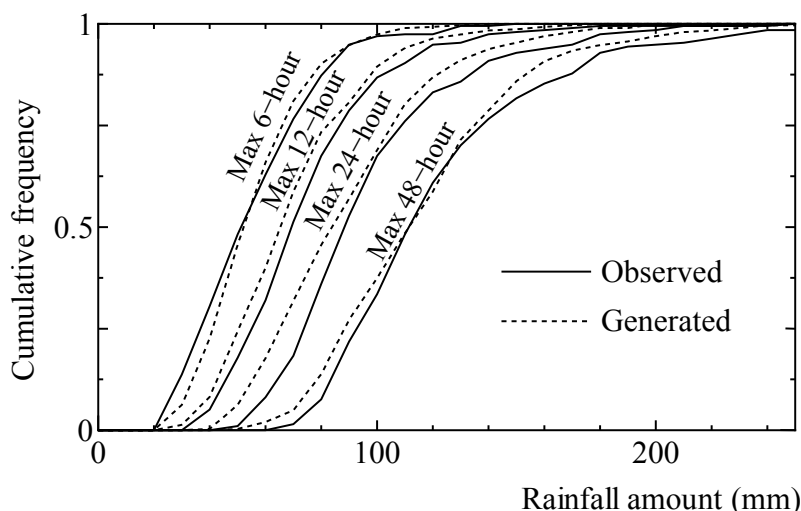


Fig. 3.12 実測および模擬発生豪雨中の各時間最大雨量の積算頻度分布

3.6 本章のまとめ

本章では、地点雨量を対象として豪雨の雨量および内部波形を模擬発生させる手法を提案し、豪雨の持つ地域特性としてその発生頻度、降雨強度、内部波形特性の再現を試み、一連の方法の利用可能性について述べた。このように対象地区の特性の再現性を十分吟味したうえで得られる模擬発生豪雨は観測値と同様に扱うことが可能であり、得られるデータは非常に実用的であることから様々な地域や研究分野への適用が期待される。本手法の特徴および模擬発生結果についてまとめると、以下のようである。

- 1) 本模擬発生手法はモンテカルロ法に基づいており、異なる雨量規模、内部波形を持つ豪雨データを1時間単位で得ることが可能である。各手順で実測豪雨より推定したパラメータを用いる。
- 2) 豪雨の総雨量は、ガンマ分布に従い決定する。この総雨量の時間雨量への配分では、時間ステップ毎の配分割合をベータ分布に従い発生させた。これにより、対象地区で観測された豪雨の降雨強度を十分な精度で再現することができた。
- 3) 内部波形の持つ自己相関特性を有する様々な波形パターンを発生させることで、本手法は様々な地域に適用可能であり、模擬発生させた豪雨は実測データの代替として種々の課題検討にむけた解析への活用が期待される。ただし、事前に対象地域の実測豪雨と比較し、データの妥当性を十分に吟味する必要がある。
- 4) 本手法は、多様な降雨強度と内部波形パターンを持つ豪雨データを得られる特性を活かし、種々の解析に対する入力データの作成が可能である。そこでは、排水計画における計画基準降雨の適切な規模や降雨波形の検討に用いることが想定される他、気候変動の影響評価においては気候予測モデル出力値の時間配分結果を利用するなど、幅広い用途が期待できる。

第4章

低平水田域に広がる冠水被害の定量的評価法の提案

4.1 はじめに

流域内の浸水被害評価手法の代表的なものとしては治水経済評価マニュアル（国土交通省河川局，2005）^[47]が定められており，一般的に浸水解析結果に定められた資産価値を乗じることで被害額を算定する（例えば小林・寶，2010）^[45]．被害を受ける対象が農地の場合も同様に，浸水深と継続日数から定まる被害率を作物価値に乘じることで被害額を算定している．ところが水田で栽培されている水稻が対象の場合は，他の作物と異なり耐冠水性を示し，冠水の発生時期（＝水稻の生育時期）やその継続期間等によって被害度合いが大きく異なる．そのため灌漑期間を通じて一律条件での評価は適当ではなく，被害の推定は複雑となる．この水稻の生育時期毎の被害特性をまとめたものとして，農林省統計調査局（1948）^[91]より得た水稻減収推定尺度（農林省農林経済局統計調査部，1957）^[90]（以下，減収尺度）があり，これが現在のところ使用されている（例えば農業農村工学会，2010）^[83]．ただしこの減収尺度は，策定当時から現在まで長期間更新されていない．また被害特性は水稻品種によって異なる可能性があり（例えば農林省宮城統計調査事務所，1951；山田・太田，1956）^[89,127]，基礎データを得た当時とは全く異なる現在の水稻品種の減収予測へこの尺度を適用するには注意を要する．近年でも水稻冠水害の発生時には多くの現地調査報告がなされているが（例えば小林ら，1978；大賀ら，1991；水沢ら，2006；進藤ら，2012など）^[46,93,73,104]，現場では冠水時の状況を把握することは困難であり，尺度の更新には至っていない．

そこで本章では，低平水田域を対象とした冠水被害の推定を目的とし，まず低平水田域の排水過程をモデル化し，水田の詳細な湛水状況の解析を可能とする．さらに，水稻を様々な冠水状況に置いた実証試験を実施し，その結果より水稻冠水害の評価指標となる減収尺度の更新を目指す．最終的に，解析された水田の湛水深情報に対し減収尺度を適用することで，生育時期や湛水深までも考慮した水稻被害の推定手法を提案する．

4.2 広域冠水被害の推定手法の構成

本提案手法は，現地観測では把握が困難な水田域の湛水状況を解析するためのシミュレーション手法と，その解析値に対して詳細な被害推定を実施するための基準となる水稻減収尺度の利用から成る．

水田の湛水状況は排水モデルを適用して解析し、1時間単位の様な短時間の結果を得る。この結果より得た水田湛水深の時間推移から水稻被害の発生の有無を判断し、被害発生水田では減収尺度より被害量を推定する。また、水稻被害推定の指標となる減収尺度は、現在栽培されている主要品種を用いて新たに策定する。これにより、目視のみでは把握が困難な流域に広がる水田被害の規模やその地理的分布を簡易かつ定量的に評価することができる。また本手法が構築されると、様々な規模の豪雨データを入力することにより雨量や降雨パターンと被害量の関係を予め想定することができる。これは例えば気候変動を想定した将来の排水リスク評価にも応用可能である。

4.3 低平水田域の排水システムのモデル化

4.3.1 選択モデルの基本構造

本地区は水田の広がる低平な氾濫域と、後背の山間部を中心とした非氾濫域に分けられる。まず非氾濫域からの雨水流出に対してはキネマティック流出モデルを適用した(角屋, 1980)^[32]。本モデルは、対象とする河川流域を長方形斜面と河道からなる小流域ブロックに分割し、各ブロックの斜面からの流出量を以下の式(4.1), (4.2)の基礎式から求める。

$$h = kq^p \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r \quad (4.2)$$

ここに、 t : 時間, h : 水深, x : 距離, q : 斜面単位幅の流量, r_e : 有効雨量強度, k, p : 斜面流定数である。ここで、マニングの式より等価粗度 N と斜面勾配 s を用いて $k=(N\sqrt{s})^p$, $p=0.6$ となる。同様に、河道流における式は以下の式(4.3), (4.4)の様になる。

$$W = KQ^P \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = I \quad (4.4)$$

ここに、 W : 河道の流水断面積, Q : 流量, I : 河道単位長当たりの横流入量, q : 斜面単位幅の流量, r_e : 有効雨量強度, K, P : 河道流定数である。

一方、勾配が緩慢な氾濫域においては河道や排水路流れは下流の影響を受けるため、ダイナミックウェーブとして扱う必要がある。さらに水田域を対象とする場合にはそこでの湛水、貯留効果も発揮される。本研究では、この氾濫域からの流出・排水解析に低平地タンクモデル（角屋・早瀬，1981；早瀬・角屋，1993a）^[33,16]を適用した。本モデルは、河川や排水路をいくつかに分割して作成した河道タンクと、それに接続する水田域を表した水田タンクで構成される。ここである河道タンク j を対象としたとき、その地点での連続式は以下のようなになる。

$$\frac{W_j^{n+1} + W_j^n}{2} \frac{H_i^{n+1} - H_i^n}{\Delta t} = \left(\frac{\sum Q_i^{n+1} + \sum Q_i^n}{2} \right) - \left(\frac{\sum Q_j^{n+1} + \sum Q_j^n}{2} \right) \quad (4.5)$$

ここで、 W_j ：河道タンク j の水面積、 H_j ：河道タンク j の代表水位、 Q_i ：流入量、 Q_j ：流出量、 $n, n+1$ ：時間番号、 Δt ：単位時間である。

また河道流の運動方程式には、以下の不等流式を使用する。

$$Q_j = \frac{A_j R_j^{2/3}}{N_j \sqrt{X_j}} \frac{H_j - H_k}{|H_j - H_k|} = G_j \frac{F_j}{\sqrt{|F_j|}} \quad (4.6)$$

$$G_j = \frac{A_j R_j^{2/3}}{N_j}, \quad F_j = \frac{H_j - H_k}{X_j} \quad (4.7)$$

ここで、 A_j 、 R_j ：河道タンクの j 流水断面積及び径深、 H_j 、 H_k ：河道タンク j と下流側河道タンク k の代表水位、 X_j 、 N_j ：河道タンク j 、 k の代表点間の距離及びマニングの粗度係数である。

次に水田タンクをみると、水面積が一定であり流入量は降水量であるので、その連続式は以下の式(4.8)で表すことができる。

$$W \frac{H_i^{n+1} - H_i^n}{\Delta t} = W r - \frac{Q_i^{n+1} + Q_i^n}{2} \quad (4.8)$$

ここで、 W ：水田タンク面積、 Q_i ：流出量、 H_i ：水田タンク水位、 n ：単位時間 Δt 毎の時間ステップ、 r ：時点 n から $n+1$ の間の有効降雨である。

水田タンクからの流出量は、越流の形態に合わせて以下のセキの公式を用いて計算する。

$$\text{潜り越流のとき：} \quad Q_i = C_2 B h_2 \frac{H_i - H_j}{\sqrt{|H_i - H_j|}} \quad (4.9)$$

または,

$$\text{完全越流のとき：} \quad Q_i = C_1 B h_1^{3/2} \frac{H_i - H_j}{\sqrt{|H_i - H_j|}} \quad (4.10)$$

ここで、 Q_i ：水田タンク i からの流入出量、 B ：セキ幅、 C_1 、 C_2 ：流量係数で、 $C_1=1.5495$ 、 $C_2=4.0258$ である。水田タンクは、複数の圃場を一纏めにしてある程度の面積を持つ遊水地として表現するのが一般的であるため、計算に用いるセキ幅 B は単位面積当たりの水田欠口幅（例えば 1ha 当たり 1.0m 程度）からタンク面積に応じて設定する。 H_i 、 H_j は水田及び河道タンク水位である。ここで水田セキ高を z としたとき、 H_i と H_j のうち高い方を H_H 、低い方を H_L とすると、 $h_1=H_H-z$ 、 $h_2=H_L-z$ と表現する。さらに上式では、 H_i と H_j との関係で順流と逆流を決定する符号（+の場合は水田から河道への流出、-の場合は河道から水田への流入）が自動的に定まるよう工夫されている。

その他、対象地区内に排水ポンプや水門等の施設が整備されている場合は施設諸元（運転開始/停止水位、排出量等）を得て、それらの流れを表す計算式を導入して地域モデルに設定する。

4.3.2 対象流域の地域モデル

4.3.2.1 非氾濫域の流域モデル

柴山瀉系統に八日市川（流域面積約 5.0 km²・動橋川流域（88.9 km²）があり、木場瀉系統には日用川流域（12.0 km²）がある。（Fig.4.1）。上記のキネマティック流出モデルを適用するため、それぞれの流域において河道に沿う形で小流域に分割し、斜面ブロックを作成した。その結果、斜面ブロック数は八日市川4個、動橋川30個、日用川5個となった。斜面ブロックは左右に分かれており、上流から順に番号付けを行っている。それぞれの流域のブロック分割は、収集した地形図（25000分の1）および、数値地図（50mメッシュ標高値）を用いてGIS上で行った。その際、各ブロック面積・河道長および標高はGISで計測し整理している。また、各斜面ブロックの斜面勾配の計測には谷線法を用いており、左右ブロックのそれぞれで勾配を数点計測し、平均した値をそのブロックの勾配とした。この非氾濫域からの流出量は、氾濫域への上流端境界条件としてそれぞれの河川へ入力する。

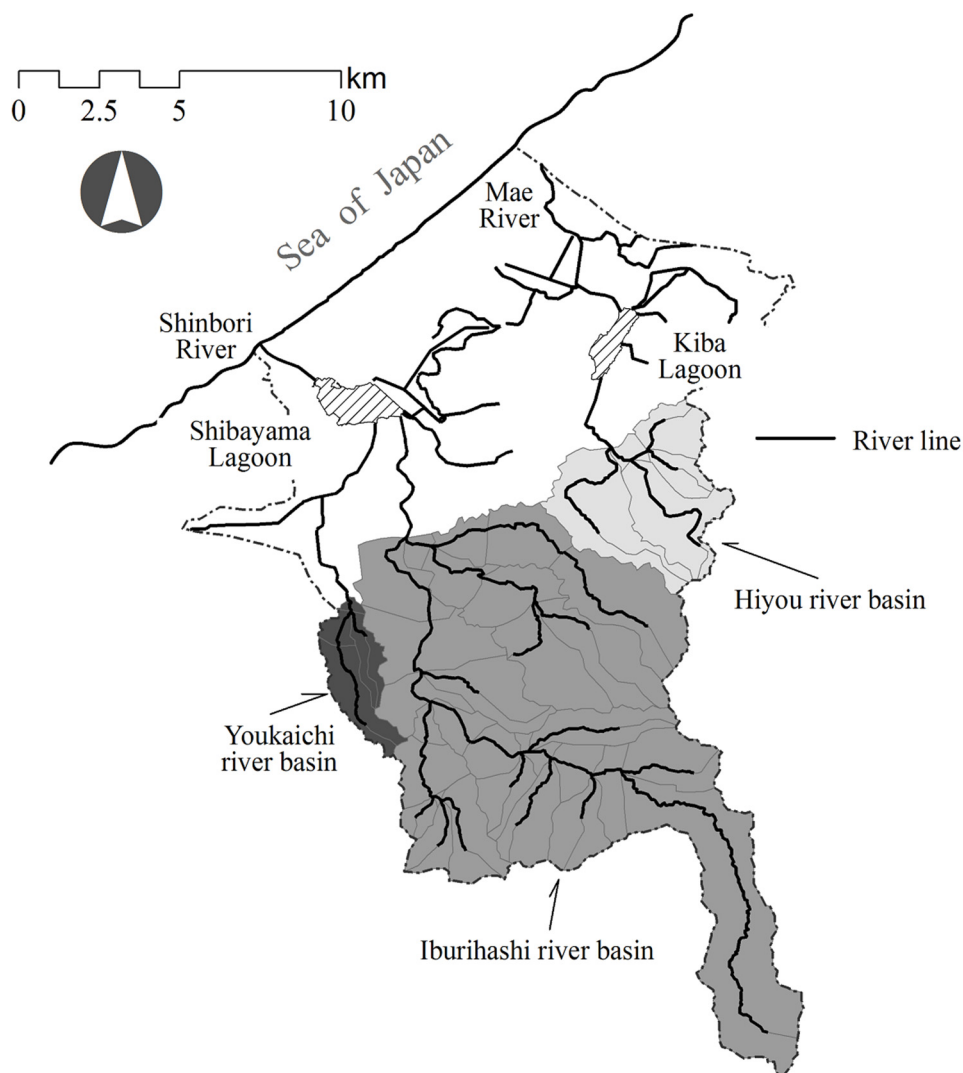


Fig. 4.1 非氾濫域の流域分割

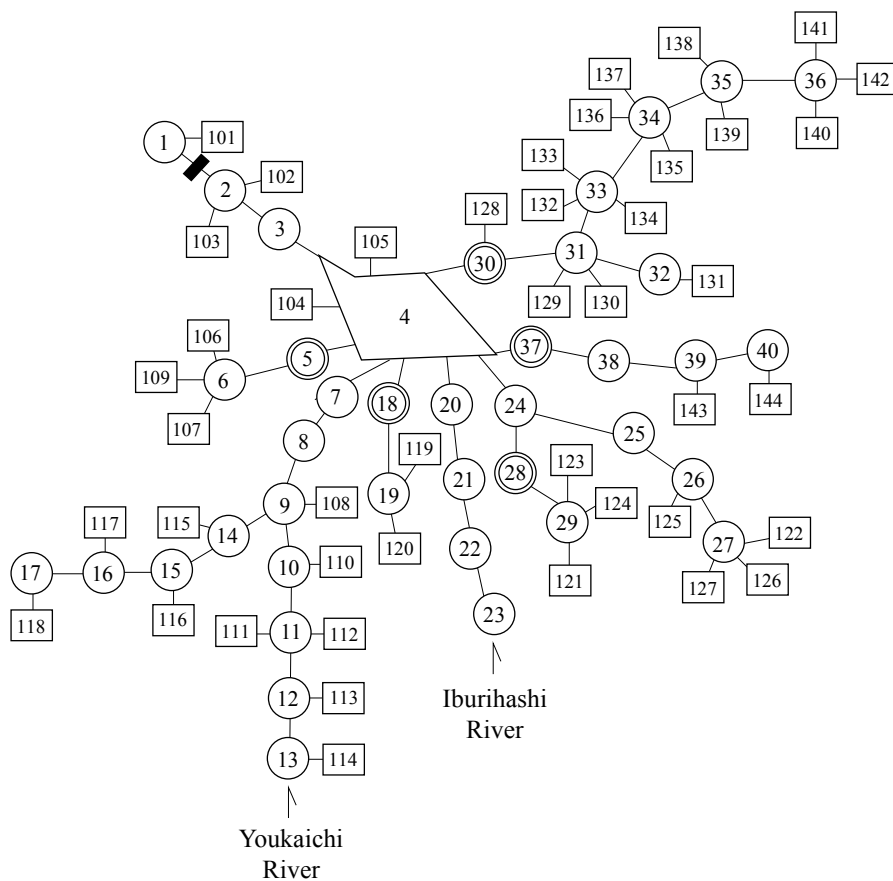
4.3.2.2 氾濫域の流域モデル

排水系統は、前述のように柴山潟系統と木場潟系統に分かれているため、ここでは二つの系統にそれぞれモデルを適用し、別系統として解析する。Fig. 4.2 にこの地区で作成した低平地タンクモデル用のブロックダイアグラムを示す。

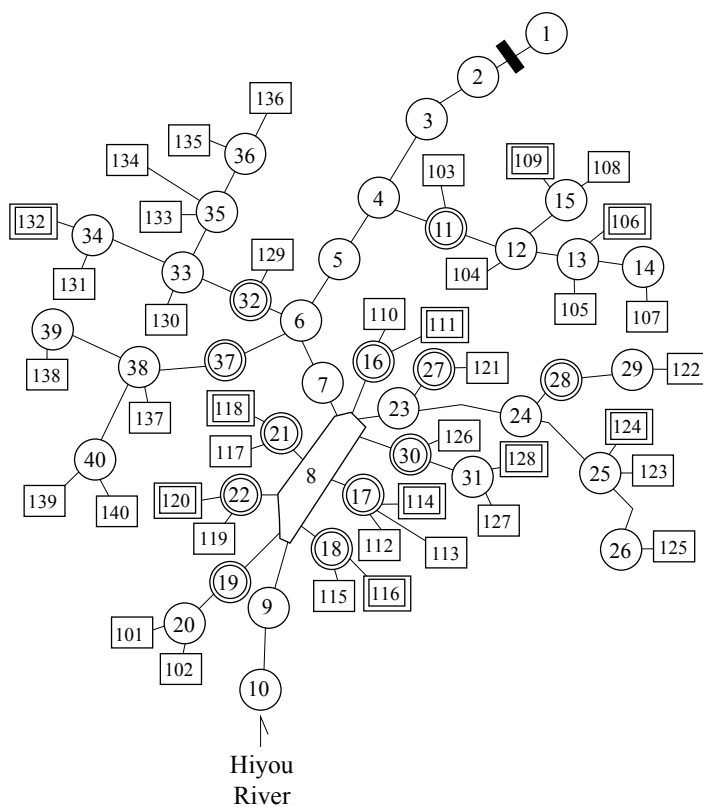
河道タンクは、河川幅の変化や排水経路を考慮しながら、長さが 500~1500m 程度になるように地形図より分割している。また、各系統にある潟は一つの大きな面積を持つ河道として扱っている (Fig. 4.2(a)4 番タンクおよび(b)8 番タンク)。河道形状・河床標高は現地測量および収集した横・縦断面図より得た。各系統で排水経路に係る排水機場を設定している。各排水機場には資料より得たポンプ台数・ポンプ容量および運転開始・停止水位をデータとして与えており、水位によって自動的に ON/OFF が切り替わる。なおポンプ容量については、ここでは容量の全量を設定している。また、各排水系統の

河口部に設置された潮止水門の操作は、各水門の操作規定より得ており、こちらも規定にしたがって自動的に開閉するよう設定した。水田タンクは、本地区の2000年前後の土地利用分類データより水田部分を抽出し、複数の区画をまとめ作成した。面積はGISで計算しており、地形を考慮しながら一つのタンクが数ha~100ha程度となるようにした。一方、流域内に都市化が進行している小松市街地を含む木場潟系統では、都市に降った降雨の一部が農業用排水系統に流入しているという情報を得た(加賀三湖土地改良区より)。そこで、この都市域からの排水の影響を考慮するため、木場型系統には都市タンクを作成している。都市タンクは水田タンクと同じく河道に接続しており、タンクへの降雨は即座に河道へ流出する。ただし、河道から都市タンクへの流入はないものとした。また、測量図面等がなく河道形状の情報が得られない河川・水路については、現地においてSystem1200 (Leica Geosystems)によるVRS-RTK-GPS測量を行い、緯距、経距および標高を測量し情報を得た。本測量手法による結果の誤差については、位置情報が既知の水準点を測量することで確認し、十分な精度(座標、標高ともに最大で誤差数cm程度)であることを確認している。一方、田面標高は収集した都市計画図(2500分の1)に記された標高ポイントより目視で読み取った(精度10cm単位)。その際、同水田タンク内に複数の標高ポイントがある場合はその平均を、標高ポイントがないタンクでは田面周辺の道路標高等より求めた推定値を設定した。その結果として得られた水田標高の分布は既に2章のFig. 2.4で示したが、柴山潟および旧今江潟の干拓農地では-1.0m以下の低標高な水田が分布していることが確認された。また、木場潟の周辺にも低標高の水田が分布しており、このような水田域では豪雨時に湛水等の被害が懸念される。

これらの結果より、柴山潟系統では河道タンクが34個、水田タンクは44個となり、木場潟系統では河道タンク35個、水田タンク30個、都市タンク10個となった。作成した河道・水田タンクは、下流より順に番号付けを行っている。非氾濫域からの流出は、柴山潟系統では13番(八日市川)および23番(動橋川)、木場潟系統では10番(日用川)の河道タンクに入力する。



(a) Shibayama lagoon network



(b) Kiba lagoon network

References

- : Channel Tank
- : Paddy Tank
- ▭ : Urban Tank
- ⊙ : Pump Station
- : Floodgate

Fig. 4.2 低平地タンクモデルのブロックダイアグラム

4.4 水稻の冠水被害の評価に向けた減収尺度の策定手法

4.4.1 冠水被害の評価基準となる減収尺度

減収尺度とは、水稻の様々な冠水条件と、そのときの収量の減収率の関係を示したものである。この尺度を活用することで、水稻の冠水状況に応じて大きく変化する減収率を推定でき、広域にわたる水田の被害評価が容易となる。しかし、上記の尺度は策定当時から長期間更新されておらず、基礎データを得た当時とは全く異なる現在の栽培品種の減収予測へ適用するには注意を要する。一方で実災害時に実施される現地調査では、水稻の被害量のデータは得られるものの被害発生当時の水田湛水深やその継続期間を把握することが難しく、両者の関係性が確認できない。そのため、この関係性を新たに得るためには、様々な冠水状況を人為的にコントロール可能な実証試験が不可欠である。そこで本研究では以下に述べる水稻の模擬冠水試験法を新たに提案し、その試験によって得られたデータより現行の水稻品種における減収尺度を新たに策定した。

4.4.2 実水田を利用した模擬冠水試験法

水稻の冠水試験はこれまでも多く実施されてきたが（例えば氏家ら，1956；岡・窪田，1961）^[120, 92]，その手順は研究者の判断によって様々で、統一された手法は提案されていない。そこで、新たに模擬冠水試験手法を提案し（皆川ら，2013，2014）^[70, 71]，実際に2012年から3年間その試験を継続して実施した。ここでは、その試験法の特徴と各項目の調査手法を示す。

4.4.2.1 水稻栽培ポットの整備と使用品種

使用する水稻は1/5,000aサイズのワグネルポット（藤原製作所製，159φ×190 mm）を用いたポット栽培とする。苗は1ポットに3本ずつ移植する。ポットに水田の土を適量投入した後、代かきの代替作業として水を入れながら土をかき混ぜる作業を数回繰り返す。水漏れを抑える。苗の移植前には作物栽培基準等（例えば茨城県農業総合センター，2010）^[25]を参照し、通常の水田と同条件で基肥を投入する。ただし、ポット内部は土壌容量が少なく、水田での栽培に比べて肥料不足に陥りやすいことから、栽培期間中は水稻の葉色を見ながら適宜追肥の判断を行う。実際には、3年間の試験時の全てで7月上旬に葉の黄変が確認されたため、基肥と同程度の肥料を全ポットに投入した。準備したポットは、冠水させて被害を発生させる冠水処理区（以下、処理区）と、比較データとなる無冠水の対照区に分けられる。尺度策定のための水稻品種には、全国の作付面積の36%程度（米穀安定供給確保支援機構，2015）^[1]を占め、現在最も一般的に栽培されているコシヒカリを利用した。

4.4.2.2 試験区の整備と特徴

試験区は通常の水稲栽培が行われている圃場内に整備する（本研究では農研機構農村工学研究部門内の精密圃場に設置）。ここで設計した試験区は、通常の水田水位を保つための通常栽培区（以下、通常区）および、人工的に水深を深くして模擬的に冠水状態を再現した模擬冠水区（冠水区）で構成されている（Fig. 4.3 および Fig. 4.4）。詳細は以下のようなものである。

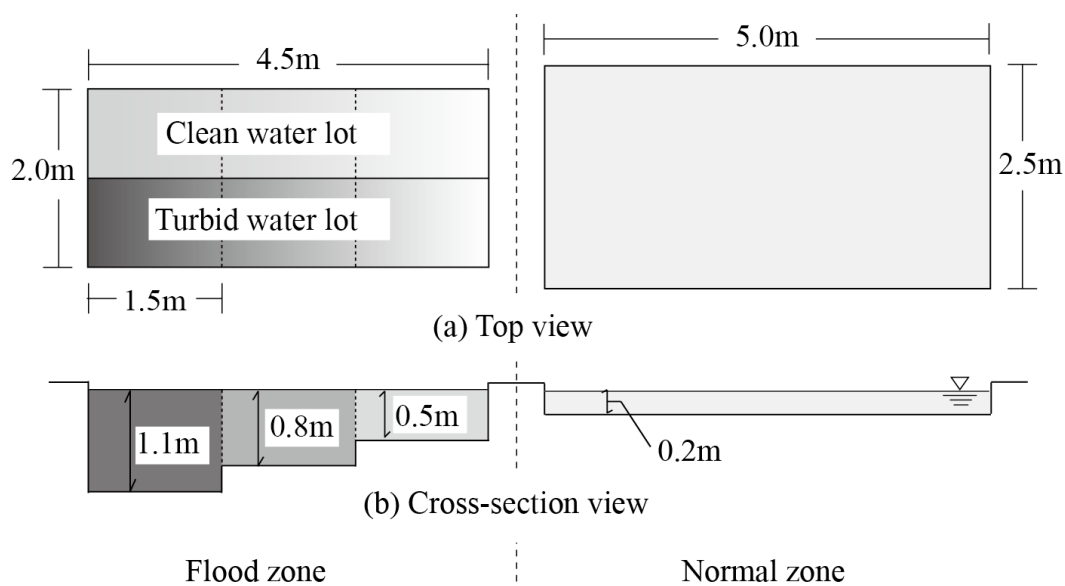


Fig. 4.3 模擬冠水試験区的设计概要

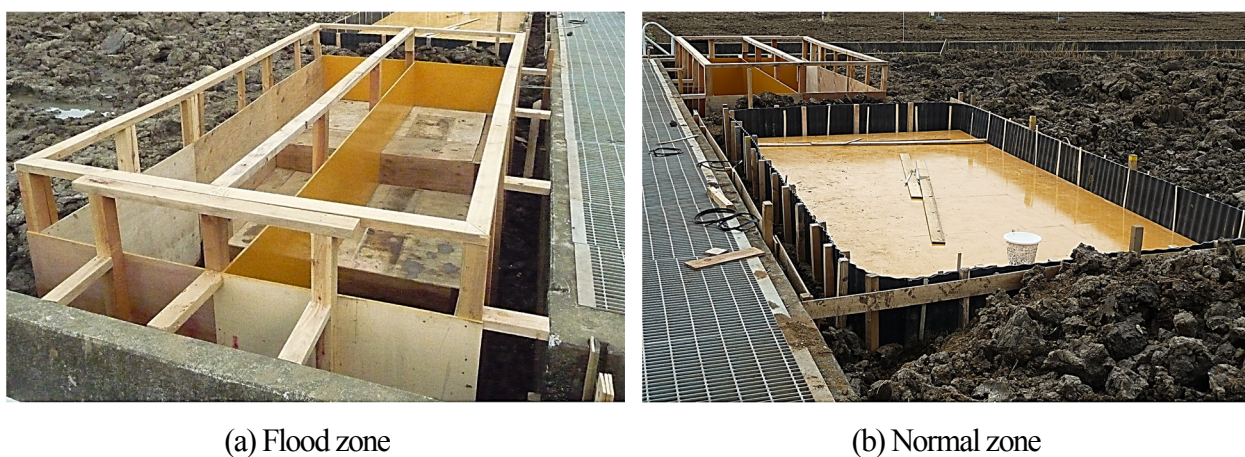


Fig. 4.4 完成した模擬冠水試験区

通常区では、使用したポットの高さが0.19mであることから、区画全体の田面標高を元の高さから0.2m程度掘り下げることで、ポット上端から用水が供給されるようにする。区画の面積は試験に使用するポット数より決定し、栽培中に日光を遮断するなど互いの生育に悪影響を及ぼすことのないよう十分なスペースを確保する。また冠水区の特徴は、田面を通常区よりさらに深く且つ階段状に掘り下げた点である。これにより、用水が区内に流入すると自動的に複数の水深が発生し、これまで実施されてきた水路や大型水槽等を利用する冠水手法と比較して深水状態を再現するための水管理の手間を省くことができる。その上、実災害時の状況や環境により近い水田の中での試験が可能である。この工夫により、同程度の草丈の水稻で試験を行う場合にも完全冠水・葉先露出（植物体の上部が水面より15~20cm程度出ている状態）等の様々な冠水状態を容易に作り出すことができる。設定水深は水稻の生育時期毎の草丈を参考に設定すれば良く、ここでは0.3m, 0.6m, 0.9mと計画した。実際には、これにポット高さを加え0.5m, 0.8m, 1.1mの3段階で田面より掘り下げている。またさらなる工夫として、冠水区内の中央を仕切り縦に2分割（清水区および濁水区）した。これにより、同時に濁度の異なる水を用いた冠水試験を可能にしている。その結果、ここで設計した冠水区では水深と濁度の組み合わせで同時に6通りの状況を再現することができる。濁水の発生方法は次項に記す。

4.4.2.3 冠水試験の手順

準備したポットは、後述する試験予定の生育時期まで通常区に置き、詳細に生育状況を観察していく。そして水稻が対象の生育時期まで成長すると、ポットを冠水区に移動させ水稻を一定期間冠水状態に置く。このとき、冠水区のうち清水区では通常の用水で冠水させるが、濁度の高い水を用いる場合には区画内に水田の土壌を適量投入し、試験中に1日1~2回の頻度で水中ポンプ（例えばポンスターPZ-550, 工進社製）等を用いて区内の水を攪拌することで濁り状態を発生させることができる。ただし、ポンプによる過度の水流により水稻が倒伏しないよう注視する。決められた冠水期間が経過するとポットを引き上げ、再び通常区に戻し収穫時期まで通常栽培を行う。なお、試験は各ポットで1回のみ実施し、冠水後は植物体の洗浄など特別な被害低減措置は施さない。収穫後はポット毎に収量調査を実施し、冠水条件による収量への影響を明らかにする。

4.4.2.4 冠水条件の設定と試験スケジュール

それぞれの測定項目について対照区の値を基準値とし、処理区の結果をそれぞれ比較することで、冠水が与える影響を冠水条件毎に明らかにする。冠水条件は、実施者が欲しいデータが得られるよう自由に設定できるが、本研究では、既往の尺度を参考に冠水試験を行う水稻の生育時期を分けつ期、穂ばらみ期、出穂期、成熟期の4段階と決定した。試験を実施するそれぞれの生育時期は対照区ポッ

Table 4.1 模擬冠水試験の冠水条件

Growth stage	Flooding situation	Water condition	Flooding duration
Tillering stage	Complete submergence	Clean water	1, 3, 5 days
Booting stage	Incomplete submergence	Clean and turbid water	1, 3, 5 days
	Complete submergence	Clean and turbid water	1, 3, 5 days
Heading stage	Incomplete submergence	Clean and turbid water	3 days
	Complete submergence	Clean and turbid water	1, 3, 5 days
Maturing stage	Incomplete submergence	Turbid water	3 days
	Complete submergence	Clean and turbid water	1, 3, 5 days

トの生育状況を調査しながら適宜判断する。なお分けつ期では、茎数を参考に最高分けつ期となる直前の時期に冠水させた。さらに草丈と水深の関係である冠水状況（完全冠水か葉先露出か）、冠水時の水の清濁、冠水期間によって条件を分類した（Table 4.1）。冠水状況は植物体を完全に水没させる完全冠水を基本としたが、既往の情報で特に冠水に脆弱と考えられる穂ばらみ期は葉先露出での試験も実施した（Fig. 4.5）。ただし、予備試験として出穂期と成熟期では葉先露出で3日間の冠水条件のみを実施している。このとき、葉先露出状態の再現には水深0.6m区画を、完全冠水では水深0.9m区画を使用した。実際には水稻の生育状態によって完全冠水でも一部葉先が露出する状況であったが、ここでは便宜上完全冠水と称する。冠水日数はそれぞれの条件で1日、3日、5日の3通りとした。冠水条件は実施した全ての年で同一であり、処理区は1条件につき3反復、対照区は15ポット用意した。

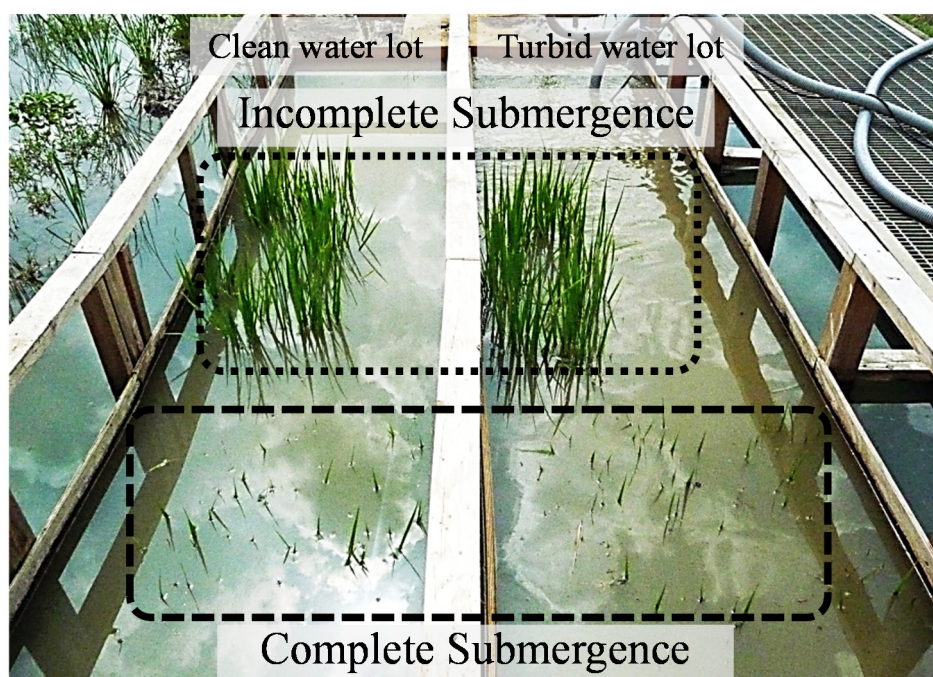


Fig. 4.5 模擬冠水試験中の様子（完全冠水と葉先露出状態）

Table 4.2 実施した冠水試験のスケジュール

Stage	2012	2013	2014
Transplanting	May 25	May 28	May 28
Tillering stage	Jun. 22 - 27	Jun. 26 - Jul. 1	Jun. 25 - 30
Booting stage	Aug. 2 - 7	Aug. 1 - 6	Jul. 30 - Aug. 4
Heading stage	Aug. 10 - 15	Aug. 12 - 17	Aug. 6 - 11
Maturing stage	Sep. 4 - 9	Sep. 5 - 10	Sep. 6 - 11
Harvesting	Sep. 12 - 13	Sep. 12 - 13	Sep. 18

実施した冠水試験のスケジュールを Table 4.2 に示す. 3年ともほぼ同時期に冠水試験を実施し, 収穫時期も同じ時期であった. 次に, 試験期間である各年の6月から9月の毎年の気象状況を明らかにするため, 日平均気温の推移および月積算降水量と日照時間を農研機構農村工学研究部門内にある気象観測露場(吉田ら, 2012a)^[129]で入手した. 水稻の生育に関する気温は, 期間全体を見た場合, 日々の変動はあるものの館野気象観測所(つくば市)での平年値(1981~2010年)の変動傾向と比較して極端な差はなかった. ただし年毎に見た場合, 2012年は, 8月に平年値より気温の高い日が続いていた. この年の8月の積算降水量は10mm未滿と極端に少雨であり, 晴天日が多かったことが積算日照時間からも分かる. また, 2014年は出穂後の8月後半に降水日が多く気温が平年値より低い日が続いていたが, 日照時間では平年値と同程度の時間があった. なお, 2014年6月の積算雨量が約300mmと多かったが, これは同月6日から8日にかけて発生した3日雨量で約175mmの降雨イベントが寄与している. しかし, この時期は分けつ期の初期にあたり, 草丈も低かったことから試験水稻には倒伏などの被害は見られなかった. 2013年の夏は全国的に猛暑であったとされているが(気象庁, 2014)^[41], 分析した気象観測露場データの8月の積算の日平均気温では2012年と2013年は大きな差はなく, 2014年だけがやや低かった. このように, 試験期間の気象状況は年による多少のバラツキはあるものの, 水稻の生育には極端な違いは見られなかった.

4.4.3 水稻の生育及び収量調査手法

試験中は, 定期的に水稻の生育調査を実施することで水稻の状態を把握する. 対照区に設定したポットでは, 栽培開始直後より草丈と茎数を測定し, 出穂時期になると穂数と稈長を調査項目に加える. これらのデータを基に, 冠水させる生育時期を判断する. さらに全期間を通じてSPAD値を測定し, 追肥の有無や収穫時期の判断等に利用する. 冠水させる処理区では, 冠水の開始直前に対照区と同様の生育調査を開始し, 引き上げ後にも調査を継続することで冠水前後での変化を捉える. 一方冠水区内では, 水稻の生育に影響を与える可能性がある水深, 水温, 濁度等を測定する. また必要に応じて近傍の気象データを収集し, 結果の分析等に利用する.

収穫した水稻は、乾燥させた後に収量調査を実施する。ここでの測定項目は、水稻全重および穂重、粗玄米重（屑米も含めた全ての玄米重）および玄米の外観品質とした。調査の中で、特に籾すり作業でのロスには収量に大きく関係するため、なるべく小型の機器を使用してその影響を最小限に抑えるよう注意を払う。本研究では厳密な作業を行うため、小型の卓上籾すり機であるTR-200 Rice Husker (Kett社)を使用した。粗玄米重を計り終わると玄米の水分率を測定し、最終的に水分15%時の値に換算した粗玄米重を使用する。外観品質の測定には穀粒判別器RGQI 10B (サタケ社)を使用した。本器は玄米1粒毎に長さ、幅、厚み、白度といった形質を測定できる上、品質は整粒、胴割粒、未熟粒（乳白粒、基部未熟粒、青未熟粒、他）、被害粒（砕粒、斑点粒、奇形粒、他）、着色粒（全面着色粒、部分着色粒、他）、死米（青死米、白死米）などの細目に自動分類できる。それぞれの項目はポット毎に玄米1,000粒中における重量比および粒数比を求め、最終的に冠水条件毎に各値の平均値やその分布幅を求め整理する。なお本研究では冠水による影響を詳細に見るため、通常の収量調査で実施されるふるい選別を行わず、全ての玄米を用いて上記項目を測定している。ただし、実施した穀粒判別では粒厚も測定されているため、そのデータを用いてふるい選別を想定した結果へ換算することも可能である。

4.5 浸水が発生した水田の抽出と広域冠水被害の推定手法

4.5.1 浸水が発生した水田の抽出

ここでは、排水モデルの解析結果から水田被害の評価に用いるデータを抽出する手法を述べる。これまでの知見より、水稻の減収量を左右する大きな要因は水稻の生育時期、冠水の継続期間および水田水深と草丈の関係が挙げられるため、被害評価の際にはこれらの条件を順次把握していく必要がある。まず冠水被害の発生およびその継続期間は、排水モデルの解析結果である水田ブロック水深から決定する。冠水被害発生の有無の判断では、排水計画上の許容堪水条件を閾値に設定した。即ち、解析期間中において水田ブロックの水深が 0.3m 以上となった場合に湛水が発生したと判断し、さらにその期間が 24 時間を超えた水田で水稻の冠水被害が発生したと判断する。なおこの湛水状態の継続期間は必ずしも連続でなくて良いこととし、解析期間中に水深が閾値をまたいで上下している場合でもその値を超えた積算時間を継続期間として使用した。ここで被害発生と判断された水田ブロックでは、次節に示すように冠水状態別の期間を判断した後に減収尺度を適用して水稻被害の評価を行う。

4.5.2 水稻の生育状況からみた冠水条件の分類と減収尺度の適用

次に、被害発生と判断された水田ブロックでは、毎時の水深を確認するとともに水稻草丈と照らし合わせ冠水状況を明らかにする。このとき比較対象となる水稻草丈は生育時期で異なるが、生育調査

Table 4.3 水田水深別の水稻冠水状況の分類

	under 0.3m	0.3m - 0.6m	0.6m - 0.9m	over 0.9m
Tillering stage	N	C	C	C
Booting stage	N	I	I	C
Heading stage	N	I	I	C
Maturing stage	N	I	I	C

※ N : No flooding I : Incompletely submergence C : Completely submergence

の結果（後に示す Fig. 4.8(a)）を参考に分けつ期で0.3m、穂ばらみ期以降では0.9mとした。さらに試験区の設計からも0.3m単位で水深を区切り、Table 4.3のように草丈と水深の関係による冠水状況を定義した。毎時水深の情報より、この表にある水深区間毎に積算時間を算定し、それぞれの状態の継続期間として被害評価に利用する。このような手順で被害評価に必要な各条件を把握し終えると、減収尺度を適用し減収率を算定することが可能となる。

減収尺度は生育時期毎にまとめられており、その適用に必要な情報は水稻の生育時期、水稻の生育時期は、解析の入力に用いる豪雨の発生日日によって事前に決定可能である。そこでは一般的な水稻栽培暦や生育調査結果に照らし合わせて対象地区での生育時期を判断し、適切な尺度を選定する。このとき、冠水期間中に水位が完全冠水状態に達した場合には完全冠水のものを、葉先露出状態で収まった場合はその尺度を用いることで、冠水期間から容易に減収率が求まる。減収尺度を冠水期間と減収率の関数とみなすと、ある水田ブロックでの減収率は以下の様になる。

$$R_i = S_{gs,fc}(t_i) \quad (4.11)$$

ここで、 R_i : 水田ブロック i での減収率 (%), i : 冠水被害が発生した水田のブロック番号, S : 減収尺度, gs : 水稻の生育時期, fc : 冠水状況, t_i : 水田ブロック i における冠水の継続期間である。

このような手順によって得られた各被害水田での減収率に対し、それぞれの水田面積と単位面積当りの収量を乗じて合計することで、以下の式 (4.12) のように流域全体の減収量が求められる。

$$D = Y \cdot \sum \{(R_i/100) \cdot A_i\} \quad (4.12)$$

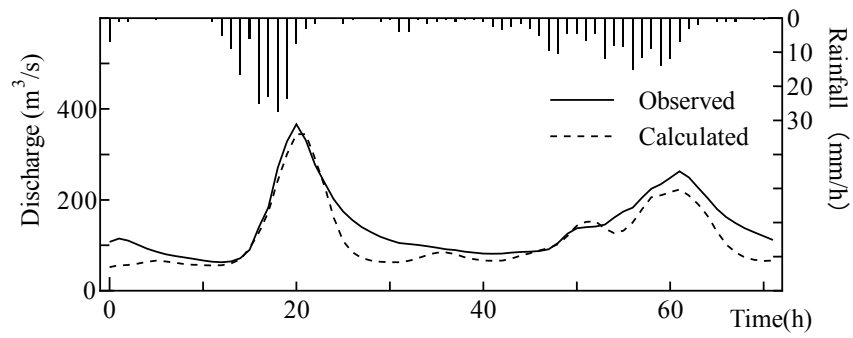
ここで D : 流域全体の減収量 (kg), A_i : 水田ブロック i の面積 (ha), Y : 対象地区における単位面積当たり年間収量 (kg/ha) である。単位面積当たりの年間収量 Y は対象地域によっても異なるが、全国の平均値である 5,300 kg/ha 等が一つの目安になり、本研究でもこの値を用いることとした。

4.6 適用結果と考察

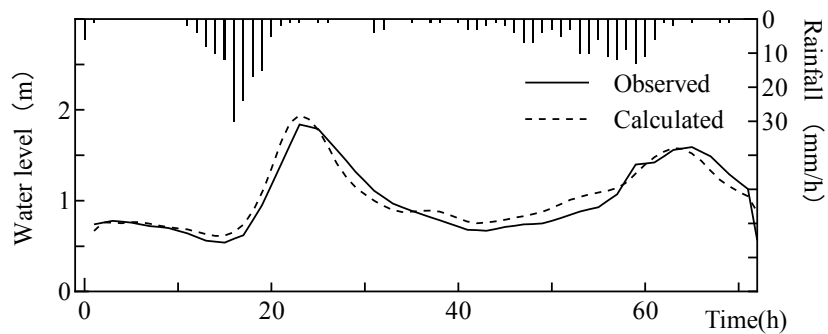
4.6.1 排水モデルの適用

構築した排水解析モデルの精度を検証するために、過去の実測豪雨時の雨量を入力とし、実測の水位、流量の再現解析を行った。本研究では、対象地区で近年観測された豪雨の中から実際に農地浸水被害等の災害を伴った2004年10月19日～21日および2006年7月16日～19日の豪雨イベント時の雨量、同期間の河川および潟の水位、水門での内外水位データを収集している。そのうち、後者の豪雨イベントについての再現解析を行った結果を以下に示す。この豪雨は、活発な梅雨前線の影響によりもたらされた豪雨であり、特に流域内の加賀市では柴山潟で水が溢れ周辺の宅地や農地が浸水するなど (Fig. 2.5)、多大な被害を被ったイベントである。

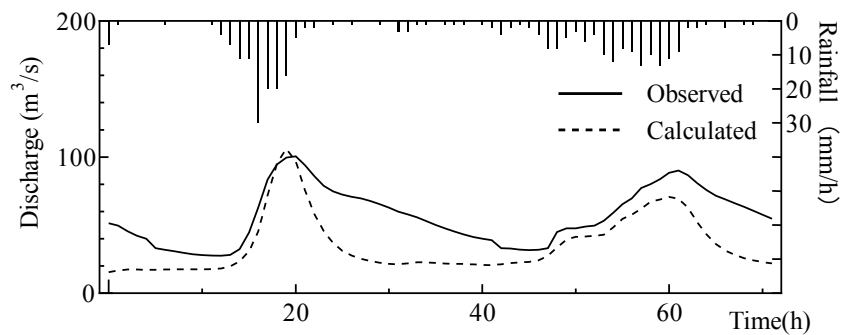
解析では、各排水系統で最下流の河道タンクに潮止水門での実測内水位を水位境界条件として与えた。また、非氾濫域からの流出量はそれぞれの河川の上端に上流境界条件として与えた。入力となる雨量については、非氾濫域には雨水保留量曲線により求めた有効雨量を、氾濫域には同地区内の観測雨量の全量を与えた。ここで、木場潟系統では非氾濫域である日用川流域内に雨量観測所がないことから、氾濫域で観測された雨量を増加 (ここでは1.5倍) させた値を用いた。また、比較に用いる実測流量は、マンニングの式を用いて実測水位より換算した推定値である。Fig. 4.6(a)～(d)に、上記2006年の期間中の雨量を入力とした解析結果と実測値の比較を示す。解析結果はそれぞれの系統で非氾濫域からの流量および、地区で水防上重要なポイントとなる潟での水位について検証しており、(a)は柴山潟系統における動橋川流量、(b)は柴山潟水位、(c)は木場潟系統の日用川流量、(d)は木場水位の結果である。Fig. 4.6(a), (c)に示した各系統で流量ハイドログラフについてみると、豪雨期間中の流出量の最大ピークは概ね再現できている。そのピークの低減が実測よりもやや早い結果となっているが、これは非氾濫域の中間流出 (地下水流出) の影響や、計算流量を比較に用いているための誤差が影響している可能性がある。この点については原因をさらに検討し、解析結果の精度を検証していく。次に Fig. 4.6(b), (d)の水位ハイドログラフについてみると、図から計算値と観測値が概ね一致しており、両排水系統で実測水位を良好に再現できていた。それぞれの結果の相対誤差をみると、流量については柴山潟系統で20.7%、木場潟系統で39.3%とやや大きい結果となったが、潟水位はそれぞれ10.3%および12.2%と高い精度で再現できていることが確認できた。このことから、本モデルによって対象地区の流況の再現が可能であることが示された。



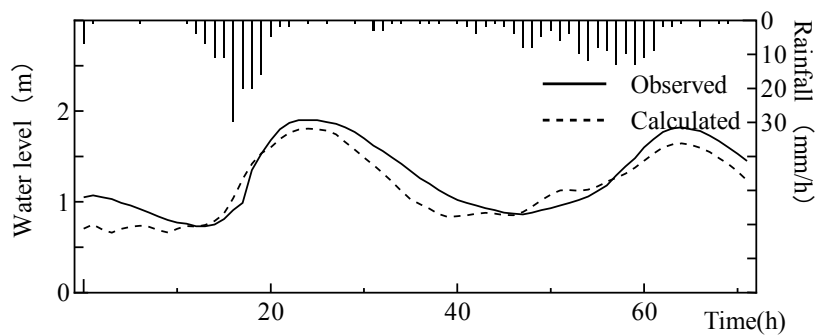
(a) Iburihashi River (Tank No.22 in Fig. 4.2(a))



(b) Shibayama Lagoon (Tank No.4 in Fig. 4.2(a))



(c) Hiyou River (Tank No.10 in Fig.4.2(b))



(d) Kiba Lagoon (Tank No.8 in Fig. 4.2(b))

Fig. 4.6 適用モデルによる水位及び流量ハイドログラフの検証

また、上記の再現期間中に推定された各水田タンクのピーク湛水深の分布をみると、**Fig.4.7** が得られた。解析結果より、この豪雨イベント時には、特に干拓農地部（旧今江潟）および両潟周辺の標高の低い水田域でかなりの湛水被害が生じていたことが推測される。この結果は、湛水被害の詳細な情報がないため検証が難しいものの、被害のリスクが高いと考えられる地域（加賀三湖土地改良区からの聞き取りによる）には概ね合致している。

これらの結果から、本モデルにより対象地区の排水過程がモデル化でき、再現解析によりその結果は一定の精度を持っていることが明らかとなった。よって本研究では、豪雨による水田被害の評価にこのモデルを使用する。なお、豪雨に加えて気候変動で予測されている海面上昇の影響までを評価する場合は、排水解析の下流端境界条件である海面水位に想定される上昇値を加算して解析することで、対応することが可能である。

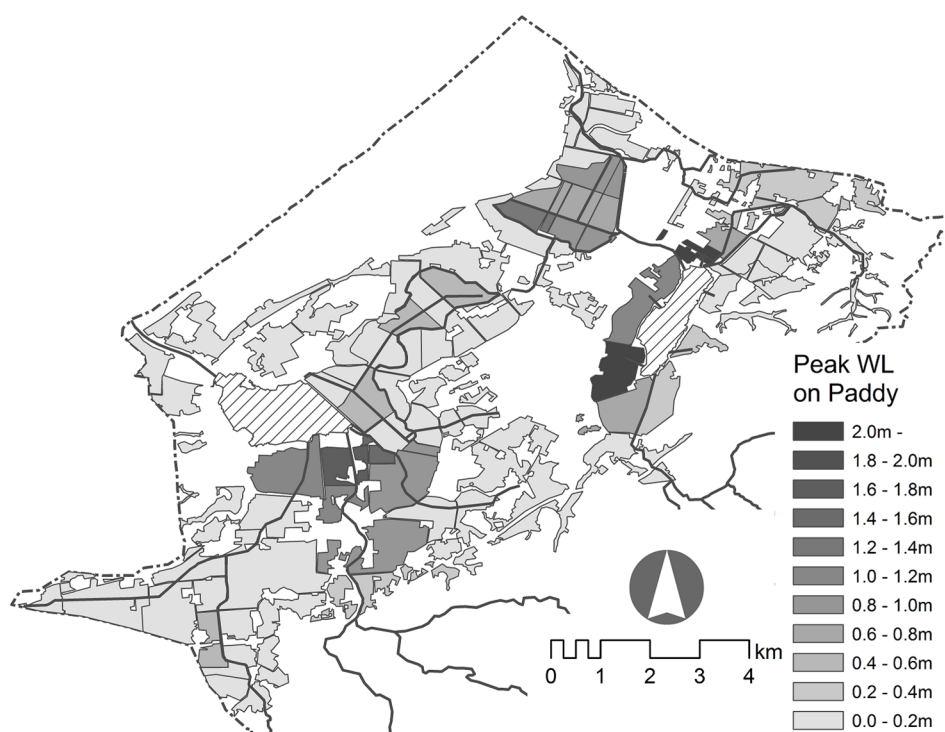


Fig. 4.7 適用モデルによる各水田の最大湛水深の解析結果

4.6.2 冠水が水稲へ及ぼす影響と減収尺度の策定

4.6.2.1 対照区における生育状況

対照区に設定した水稲の生育状況（草丈、桿長、莖数、穂数）は**Fig.4.8**のようであった。草丈は移植後から徐々に伸長し、7月半ばから8月にかけて急速に高くなり出穂前後には変化が小さくなる。

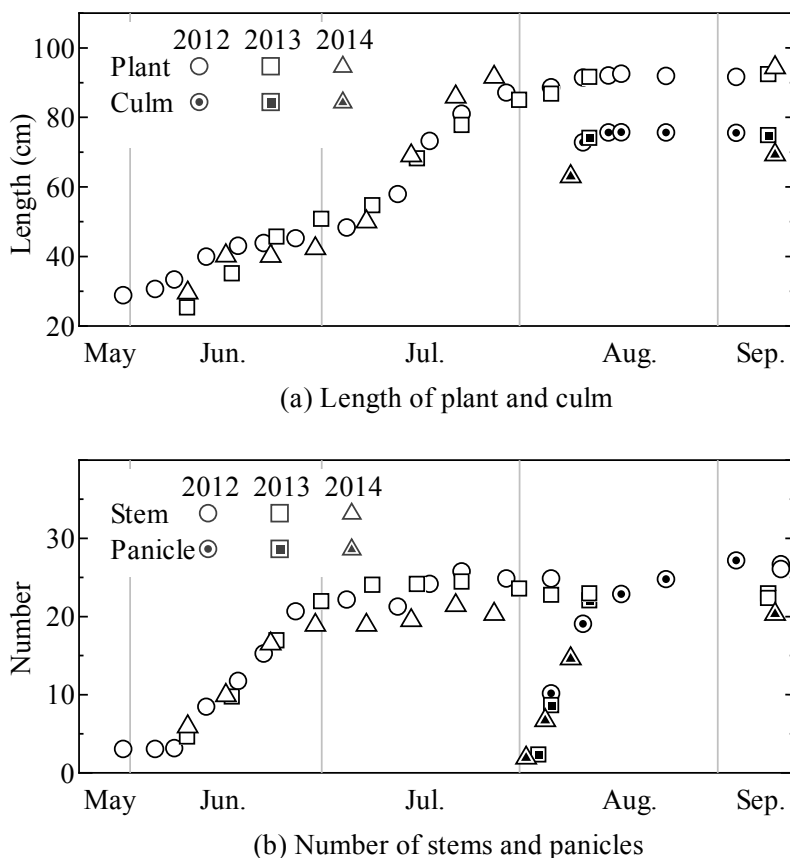


Fig. 4.8 対照区の生育調査結果

出穂後の8月以降はほぼ横ばいとなり、収穫直前には90cmを超える程度まで伸長していた。またそのときの桿長は75cm程度になった。茎数は分けつ期にあたる6月中に増加し、7月に入って20本から25本程度まで増加して以降は大きな増減がなく、収穫時期まで横ばいであった。試験中の出穂の開始は8月初旬でほぼ同時期であり、3年とも8月10日頃には穂が出揃っていた。また茎数と穂数が概ね同数となったことから、無効な分けつはほぼなかった。これより、試験を実施した3年間の対照区の栽培状況には大きな問題がなく、本結果を減収尺度策定のための基準値として取り扱うことは妥当といえる。

4.6.2.2 冠水区の濁度と水温

Table 4.4 に、冠水試験中に観測した清水区および濁水区内の濁度を示す。濁水区は最大の冠水期間である5日間の毎時の値の平均値であり、清水区は1日に1~2回測定した値の平均値である。表より、冠水試験中には清水区と濁水区で明確な濁度の差があったことが分かった。ただし、濁水は水中ポンプによる攪拌で発生させたため、攪拌直後から時間経過と共に濁度が漸減しており、冠水期間中は一定の値ではなかった。

Table 4.4 冠水区内の平均濁度

Growth stage	Lot	Turbidity (mg/L)		
		2012	2013	2014
Tillering stage	Clean water lot	266.4	—	7.0
	Turbid water lot	448.9	422.6	145.1
Booting stage	Clean water lot	136.3	67.2	79.2
	Turbid water lot	448.9	422.6	145.1
Heading stage	Clean water lot	96.7	115.0	65.8
	Turbid water lot	366.7	432.7	129.6
Maturing stage	Clean water lot	83.0	58.3	38.8
	Turbid water lot	371.0	381.8	122.2

冠水区内の水温は、2013年と2014年に水面から深度別(0m, 0.1m, 0.2m, 0.3m, 0.5m)に5点測定した。特に水溫の高い8月には、完全冠水時に穂が浸かる水面付近では最高で35°Cを超える状況があった。また下層になるに従って水溫は低下し、例えば水面から0.5m付近では、日中は水面直下より3~4°C低い状況であった。このような高い水溫は、穂の生育に影響を与え高温障害に繋がる可能性がある。ただし本研究では水溫状況と最終的な収量との関係を明らかにするまでには至っておらず、その解明は今後の課題となる。

4.6.2.3 粗玄米重の比較

3年分の粗玄米重の測定結果より、その平均値および最大、最小値の幅を冠水条件毎にまとめるとFig.4.9が得られた。利用したデータ数は1条件につき9個(3反復×3年)、対照区は45個である。対照区ではポット当たりの粗玄米重は平均で33.3gとなった(標準偏差は5.0)。ここで、全国農業地域別・都道府県別累年統計表(農林水産省大臣官房統計部, 2016)^[85]にある水稻作況標本筆調査成績によると、2012年から2014年の一株当たり粗玄米重の平均値は約31.8gであった(10a当たり粗玄米重および1m²当たり株数の全国平均値より計算)。さらに、本冠水試験を実施した通常水田内での一株当たり粗玄米重は36.5g(標準偏差8.3)であったことから、この対照区の結果は通常の栽培と遜色がなく、妥当な値であったといえる。この値を基準として、処理区の平均値を比較すると、全ての冠水条件で減少していた。ただし、その減少度合いは生育時期によって大きく異なる。特に脆弱な穂ばらみ期では、清水・濁水に関わらず1日間の冠水でも粗玄米重は対照区と比べて約40%減少し、出穂期でも30~40%の減少が見られた。これらの値は冠水期間に伴って増加し、穂ばらみ期では5日間の冠水で80~90%の減少となることから、長期冠水後に栽培を継続しても収量はほぼ見込めない(Fig.4.10(b)に、穂ばらみ期に濁水で5日間完全冠水させた水稻の外観を示す)。一方で、穂ばらみ期であっても葉

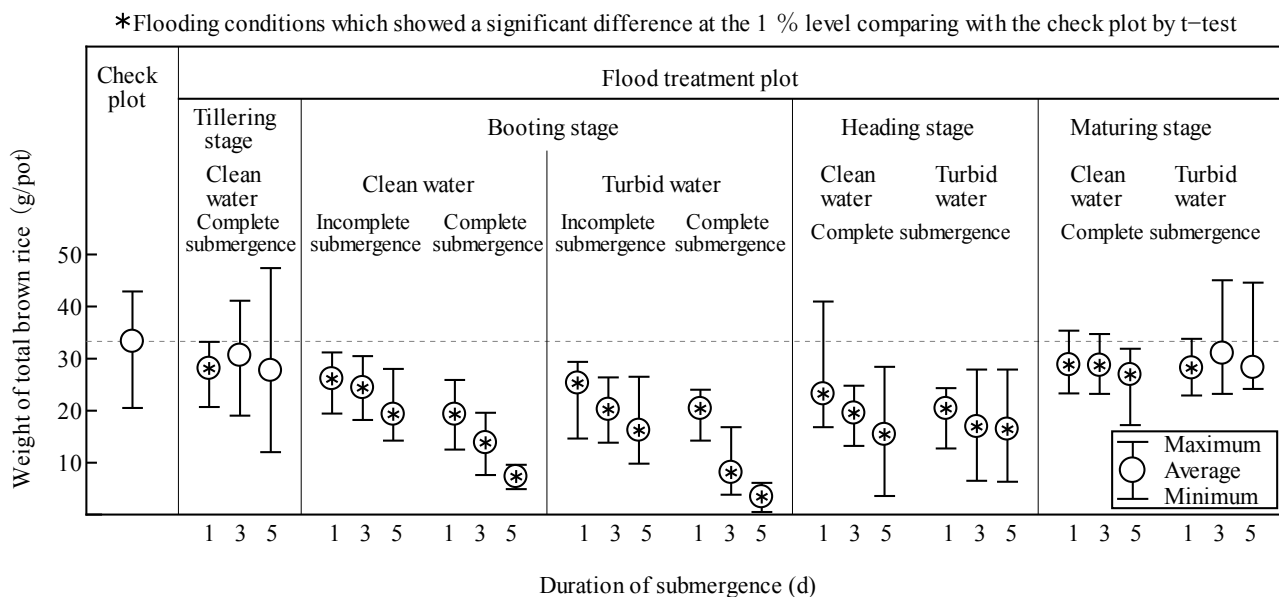


Fig. 4.9 対照区と冠水処理区における粗玄米重の比較



(a) Check plot (b) Flooded 5 days with turbid water in booting stage

Fig.4.10 冠水処理による水稻外観の変化

先露出状態で冠水した場合には完全冠水時の半分程度の被害に留まった。このことから、やむを得ず水稻冠水が発生した場合でも水深を草丈未満に抑えることで大きな被害軽減策になる可能性が考えられる。生育初期段階の分けつ期と収穫直前の成熟期では、冠水期間の長短の影響は小さく、粗玄米重の減少割合は7~15%程度であった（最大では19%程度）。Fig.4.9中に記したt検定の結果でも、一部の条件では対照区との有意差が見られなかったことから、出穂前後の時期と比較すると耐冠水性が高い時期といえる。ただし、これらの時期でも粗玄米重は減少する上、成熟期では穂発芽など他の減収要因も発生し得ることには留意する必要がある。

次に、濁度の違いによる被害度合いへの影響を見るため、清水区と濁水区のみが異なる条件間で結果を比較した。例えば Fig. 4.9 における穂ばらみ期の結果より、粗玄米重の減少量は清水区に比べ濁水区での低下がわずかに大きいように見えるが、極端な差とまではいえない。t検定では、穂ばらみ期の3日および5日冠水では清水区と濁水区の間に5%水準で有意差が見られたものの、他の期間では有意差がなかった。これより、濁度の高低は、生育時期や冠水期間といった条件と比較して、水稻に与える影響が小さい可能性が示された。ただし、実際に高い濁度の水で冠水が発生した場合には、水田内への土砂堆積が発生する恐れがある。治水経済調査マニュアル（国土交通省河川局，2005）^[47]では50cm未満の土砂堆積でも70%の減収があると見積もられている他、濁水中では水稻の光合成も困難になることから、清水と比較して濁水での冠水は相対的に被害リスクが高くなる可能性がある。

4.6.2.4 冠水に伴う玄米の外観品質の変化

次に、穀粒判別器による玄米外観品質の判定結果を見る。ここでは、各結果の玄米1,000粒中における重量比を利用した。まず基準となる対照区の結果を年毎に比較すると（Fig. 4.11），2012年と2014年は整粒重量比が約70%，未熟粒は約20%となり高い整粒の割合が示されたのに対し，2013年は整粒が約30%，未熟粒が約64%となり，他の2年と比較して極端に品質が悪い結果となった。またこの年は，冠水させた処理区でも外観品質の結果が他の年と異なる傾向を示していた。この原因を探るため，割合が増加した未熟粒を詳細に分類したところ，2013年は基部未熟粒のみが大幅に増加しており，白未熟粒など他の種類は特に増加していないことが分かった。基部未熟粒は登熟の最後に充実する基部

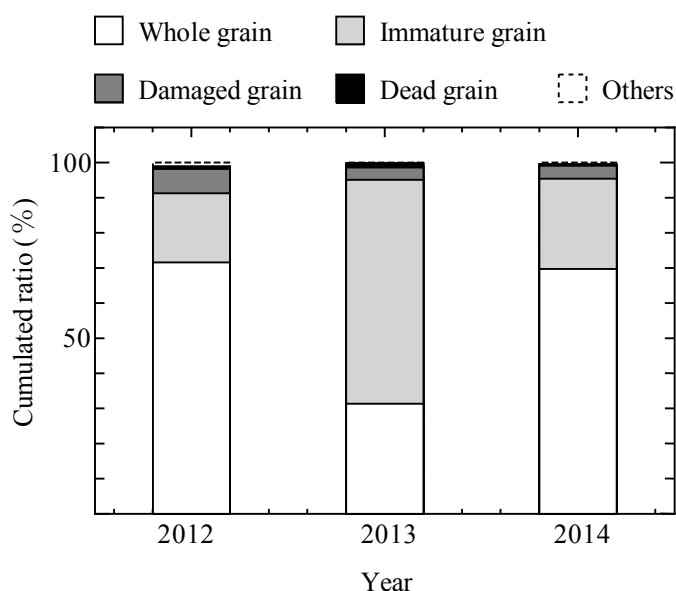


Fig. 4.11 対照区における玄米品質の判別結果

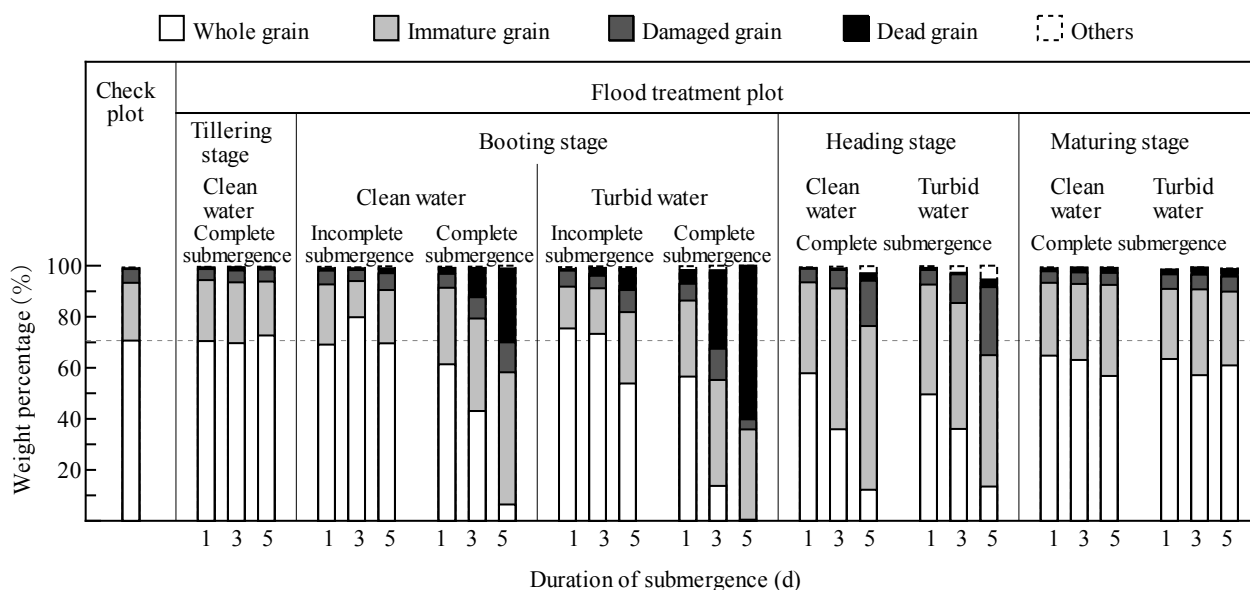


Fig. 4.12 冠水による玄米の外観品質への影響 (2012年と2014年の平均)

の充実不良によるもので、発生原因として高温による影響（例えば長戸・江幡，1965）^[76]や、早刈りによる登熟不足、肥料不足等が考えられる。しかし、前述のように2013年のみが極端に高温であったわけではない。収穫時期の目安として用いられる出穂以降（ここでは8月10日以降）の日平均気温の積算値を見ると、2013年では約943°Cであり、他の2年（952～956°C）より若干低いものの、品質にこのような大きな差がでるとは考えにくい。また肥料は毎年同様に投入しているため、年毎の違いはない。このように、2013年のみ未熟粒が大幅に増加した原因は解明できていない。そのため、玄米外観品質については2013年のデータは使用せず、2012年と2014年の2年分を用いることにした。

2012年と2014年の品質調査より得た各項目の重量比の比較を Fig. 4.12 に示す。図より、対照区（整粒重量比約70%）と比較して、穂ばらみ期と出穂期には長期の完全冠水によって整粒重量比の大きな低下が現れた。ただし、品質への被害の出方は両時期で少し異なっている。出穂期では冠水期間が長くなるにつれ主に未熟粒と被害粒が増加していたのに対し、穂ばらみ期では未熟粒に加え、さらに大きな被害である死米の増加が目立った。これらの時期では3日以上完全冠水すると整粒はほぼ収穫できない。ただし、葉先露出状態を保つことで、粗玄米重と同様に品質の面でも被害軽減効果が期待できることが明らかとなった。分けつ期では、冠水期間に関わらず対照区とほぼ同じ結果であった。この時期は栄養成長期にあたり、葉鞘の中で幼穂ができる前の時期にあたるため、冠水による穂へのダメージがなく玄米外観品質への影響が微少であったと考えられる。一方成熟期では、冠水によって整粒重量比が5～10%程度低下しており、分けつ期とは異なる傾向が示された。このように、冠水の影響は粗玄米重と品質では出方が異なる場合があり、冠水被害を明らかにするためにはこの両方の結果に注目する必要があるといえる。その他の分類として着色粒や胴割粒等も測定しているが、これらは全体から見ると合計で数%程度と割合が少なく、冠水によって劇的に増加しないことが確認された。

4.6.2.5 玄米整粒重に注目した水稻減収尺度の策定

これまでの結果より、水稻への冠水被害を見極める場合には、玄米の重量と共に外観品質までも考慮する必要があることが示された。よって本研究では、減収尺度策定の基礎データとなる減収率の算定に、粗玄米重から不完全米（未熟粒、被害粒、死米などの屑米）を除いた値である整粒重を用いることとした。すなわち本研究における整粒重とは、**Fig. 4.9**の粗玄米重と**Fig. 4.12**中に示す整粒重量比の積として計算される。対照区の値を冠水による減収がない場合の基準値（減収率0%）とすると、その値に対する各冠水条件での整粒重の減少割合（減収率）は以下の式(4.13)によって求まる。

$$YR_t = \frac{W_c \times Q_c - W_t \times Q_t}{W_c \times Q_c} \times 100 \quad (4.13)$$

ここに、 YR_t ：ある冠水条件での減収率（%）、 W_c 、 Q_c ：対照区の粗玄米重（g）および整粒重量比（%）、 W_t 、 Q_t ：ある冠水条件での粗玄米重（g）および整粒重量比（%）である。この式より得られた結果を、生育時期別に冠水期間の関係で整理することで**Fig. 4.13**のように水稻減収尺度が得られた。

図より全ての冠水条件で減収が発生しており、その割合はこれまで述べた様に冠水する生育時期と冠水期間で大きく異なる。特に被害の大きい穂ばらみ期と出穂期では、穂ばらみ期の方がやや高いものの概ね同程度の減収率であった。これらの時期では1日の冠水でも50%近く減収し、5日間での減収率は100%に近い。また、分けつ期では最大で約16%、成熟期では20~35%の減収率が示された。出穂前後の時期では、冠水期間が減収率に大きく影響しているが、分けつ期と成熟期では1日冠水と5日冠水での差が大きくなり、冠水期間の影響が小さいことが分かった。一方、葉先露出状態での減収率は完全冠水時の4~6割程度に抑えられており、予備試験で得た出穂期と成熟期の結果（葉先露出状態で3日間冠水）でも同様であった。これらのことから、水稻の冠水被害を推定するためにはその時の生育時期と冠水の状況を可能な限り把握することが肝要といえる。

4.6.2.6 減収尺度の活用面と留意点

本尺度は、冠水による直接的被害と、引き上げ後に発生し得る二次的な被害（例えば病害の影響など、狩野ら、1982）^[36]を併せた総合的な冠水被害をまとめたものである。利用方法としては、目視のみでは早期確認が困難な広域での冠水被害算定への活用が挙げられる。ただし、実災害時には冠水期間や水深などの現場状況を正確に把握できない他、気象条件による生育状況の違いや、多量の土砂流入、流水や風害による稲の倒伏や穂発芽等、多様な要因が複雑に絡み合うため、この尺度のみを用いて十分な被害推定を行うには限界がある。本尺度による推定結果は、被害全体の概要をつかむための

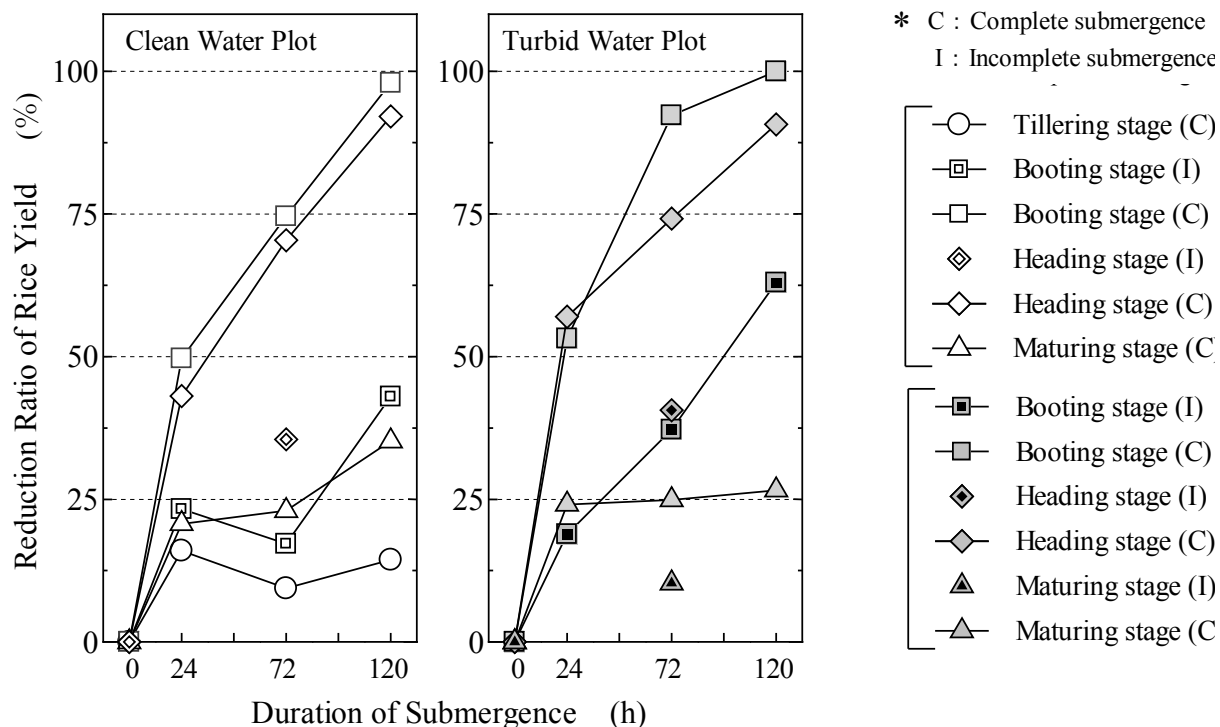


Fig. 4.13 玄米重量と品質の低下に注目した水稻減収尺度

速報値としての役割が考えられる。土砂流入や風害の影響を考慮したい場合には、冠水による減収率に対してそれらの影響を想定した減収率を上乗せして被害評価に使用することなどが考えられる。

一方で、本尺度を水田の冠水状態を再現可能な排水解析等のシミュレーション出力（例えば Minakawa and Masumoto, 2013）^[69]へ適用することで、水深と草丈の関係から水稻の冠水期間や葉先露出の有無までも詳細に想定した被害推定ができる。これにより、将来予測されている農業への気候変動のリスク評価で水稻被害を対象にすることで、農業への影響をより直接的に評価できる可能性がある。また減収尺度は逆の見方をするすることで、水稻被害がある程度以下なる耐冠水性を示すことになり、そこから浸水被害を最小化する水田の許容湛水条件を読み取るなど、水田域を活用した流域全体の豪雨対策検討に向けた基礎資料になり得る。ここで示した尺度は3年間の試験結果をまとめたものであるが、現地調査報告や新たな試験により同様のデータが蓄積され次第尺度を適宜更新することで、より精度が向上する。さらに海外の水稻品種を用いた分析事例（Kotera et al., 2005 ; 坂上ら, 2012 など）^[49,97]とも併せて評価することでアジアモンスーン域を含めたより広域での活用が期待される。

4.6.3 広域の水田冠水被害の推定

対象地区で構築した排水モデルによる、2006年の豪雨イベントに対する再現解析結果にここで策定した減収尺度を適用して水田の被害評価を実施した。まず、減収尺度の選択に関わる水稻の生育時期

は、豪雨の発生日（7月16日～19日）より穂ばらみ期と決定し、その時期の尺度を適用した。本研究では濁度の高低で尺度を分けて策定したが、排水モデルでは濁度の推定は行っていないことから、ここでは最悪の場合を想定するために濁水区の尺度を選択した。入力した降雨は既に示した3日雨量であるが、実際は降雨終了後にも水田の湛水状態が継続することから、新たに無降雨日を3日間加えて合計6日間の解析を実施し毎時の水田水深を得た。なお、被害水田の抽出及び水稻冠水状況の分類は4.5節で示した条件を適用した。

このようにして求めた被害発生水田における減収率と、水田ブロック面積、および最終的に計算された水稻の減収量を **Table 4.5** に示す。表中の水田 No. は **Fig. 4.2** で示したブロックダイアグラムのそれと対応している。この結果より、被害の発生面積は柴山潟系統で約300ha、木場型系統では約480haと推定された。さらに水稻被害では、単収に平年収量の全国平均値（5,300kg/ha）を用いた場合には両系統で合計約1,980t、即ち約33,050俵（1俵は玄米60kg）の減収となった。この量は、被害がなかったと仮定した場合の流域全体の収量（水田面積×平年単収）から見ると約9.5%に相当する。またこの被害量を損失金額に換算すると、例えば全国米穀取引・価格形成センター（H23年3月解散）取引結果より被害が発生した H18 年度石川県産コシヒカリの通年取引価格である 16,128 円/俵を基準に用いた場合には、約 5.3 億円に上ると算定された。この結果は1つの豪雨イベント時の算定事例であるが、一連の評価手法は流域内に面的に広がる水田域への冠水被害を迅速に推定するために有用であり、豪雨特性である雨量規模や内部波形パターンに変化が起こった場合の被害変化量を算定するなど、気候変動によるリスク評価等への活用も見込まれる。

Table 4.5 浸水発生水田における水稻の冠水期間とそれによる減収量

Basin name	Paddy No.	Inundation duration (h)	Flooding condition	Reduction ratio (%)	Paddy area (ha)	Damage (ton)
Shibayama lagoon network	106	90	I	46.9	60.0	149.2
	119	51	I	29.2	84.4	130.5
	123	112	C	98.7	14.7	76.9
	129	47	I	27.7	58.7	86.0
	135	44	I	26.5	33.0	46.4
	140	39	I	24.6	48.8	63.6
Kiba lagoon network	101	30	I	21.2	66.3	74.4
	110	122	C	100.0	20.5	108.7
	117	110	C	98.4	81.2	423.3
	119	22	C	48.8	64.6	167.0
	121	51	I	29.2	28.1	43.5
	129	92	I	48.0	19.3	49.1
	130	91	I	47.5	23.0	57.9
	131	75	I	38.9	32.0	65.9
	133	83	I	43.2	92.4	211.3
135	58	C	80.9	53.5	229.3	

* I: Incomplete submergence C: Complete submergence

4.7 本章のまとめ

本章では、低平農地域の流出と排水過程をモデル化すると共に、その解析結果に水稻の減収尺度を適用することで、流域内に広がる水田被害を推定する手法を提案した。その成果および特徴についてまとめると、以下のようである。

- 1) 非氾濫域からの流出とそれを受ける氾濫域の排水過程にモデルを適用し、実測の豪雨イベントを入力とした。その結果、両者の結果は流量及び水位の観測値を十分な精度で再現できたことから、本モデルによってこの地区の広域排水リスクの評価が可能となった。
- 2) コシヒカリを対象として、分けつ期、穂ばらみ期、出穂期、成熟期のそれぞれの生育時期における冠水被害の基礎データを得るための模擬冠水試験法を提案した。試験結果より、あらゆる生育時期において、冠水することで粗玄米重が減少した。ただし、その度合いは時期によって大きく異なり、特に影響を受けたのは出穂前後の生育時期である。この時期には1日の冠水でも大きく粗玄米重が減少し、さらに長期間冠水すると収量はほぼ見込めない。一方、冠水時に葉先露出状態であった場合には大きな被害軽減効果が見られた。
- 3) 上記の重量変化に加えて、玄米品質に係る整粒重量比も出穂前後の時期に冠水することで大きく低下した。このことから、水稻冠水被害の評価では重量と品質の両方の低下に注目する必要があるといえる。
- 4) 粗玄米重と整粒重量比の積として得た整粒重を用いて、生育時期毎に冠水期間と減収率の関係を示した減収尺度を策定した。その結果、穂ばらみ期と出穂期では1日の完全冠水でも50%程度の減収が見込まれるが、葉先露出状態での冠水では被害がその4~6割程度に留まった。一方分けつ期と成熟期は、出穂前後の時期と比較すると影響は小さいものの、冠水による減収は発生する。
- 5) 排水解析モデルの水田水深の出力に対して減収尺度を適用することで、流域レベルで発生した水稻の冠水被害の算定手法を提案した。実測豪雨の解析結果に適用したところ、広域の水田域に発生した被害量およびその損失額を推定することができた。一連の評価手法は、目視や現地調査のみでは困難な面的に広がる被害推定に適用でき、将来の気候変動に伴う豪雨特性の変化が低平農地域にもたらすリスク評価やその対応策検討などへの応用が可能である。

第5章

不確実性を考慮した広域排水リスクの評価手法の開発

5.1 はじめに

「リスク」の意味は対象分野によって異なるが、一般的には人間の生命や経済活動にとって望ましくない事象の発生とその不確実性の程度、および結果の程度等として定義され（日本リスク研究学会，2006）^[78]，金融，健康，自然災害といった様々な分野で合理的な意思決定を行うための重要なポイントとなる（Vose，2000）^[122]。このリスク分析は，大きく分類すると評価対象に対してのリスクの明確化，影響度合いを定量化するリスク評価，その回避や低減を図るリスク管理，情報の共有を目指すリスクコミュニケーションまでの一連の流れで構成される（日本リスク研究学会，2008）^[79]。本研究で取り扱う自然災害分野のリスク評価では，対象事象の発生確率と被害規模の積，あるいは外力であるハザードと脆弱性を用いて評価するのが一般的である（例えば馬奈木，2013）^[57]。一方で，リスクは未来の出来事であり，それがもたらす不確実性を完全に克服はできないことから（松原，1989）^[65]，リスク評価の際にはその不確実性をいかに評価するかが鍵となる。広域排水に関連する不確実性要因の一例として降雨に注目すると，データの観測精度や蓄積期間，確率雨量の推定手法，雨量の空間分布や降雨波形（時間分布）など多くの項目が考えられる。ところが現在の排水計画では，予め決定した1つ（あるいは数個）の計画基準降雨を安全に排除できるよう施設規模を設計する決定論的な方法がとられており，そこには不確実性が考慮されていない。さらに気候変動等を見越した長期的な治水計画を想定するためには，不確実性の大きい将来の気候シナリオに頼らざるを得ず，この不確実性の定量評価の重要性はより高まる。この不確実性を含んだリスクを治水・利水計画等の様々な場面で考慮するためには，前述のような決定論的な計画法では十分でなく，対象リスクの発生確率を表す確率分布形状を特定し，それを活用した確率論的な計画法を確立する必要がある。既に吉見ら（2015）^[132]やWangら（2015）^[124]は，降雨の不確実性から流出高といった水文情報を確率的に示す手法を検討し始めており，このリスクを考慮する取り組みは進められている。しかしこの両者は河川工学分野を対象としており，本研究で取り扱ってきた低平農地域の浸水・氾濫被害の検討は対象とされていない。さらに水田を対象とする場合は，水稻被害の算定が煩雑であることがリスク評価を複雑にする要因となる。そこで本章では，まず低平農地域の広域排水リスクに不確実性をもたらす要因を考察するとともに，その不確実性を確率的に表す手法を新たに提案する。さらに，これまでに得た各章での知見を利用し，広域排水リスクに対する不確実性を定量的に評価する手法を開発する。

5.2 水田域の排水に関わる不確実性の分類例

Vose (2000) ^[122]によれば、「不確実性」は偶然の作用である変動性と、知識の不足から生じる不確実性に大別される。変動性は分析対象が本来持っているランダムな性質を指しており、それを評価するためのシステムを物理的に変更することで影響を軽減できる可能性があるが、観測では回避できない。一方後者は無知が原因であるため、対象事象の詳細な観測によってデータを蓄積させることで回避できる可能性がある。また池田・盛岡 (1993) ^[26]によると、不確実性の種類には、曝露評価のためには事象のシナリオに関するもの、パラメータに関するもの、モデルに関するものなどの他、もっと根本的には(a) 確率的なもの、(b) 偶発的なもの、(c) 未解明なもの、(d) 本質的なもの、(e) 交渉条件的なものなど、性質の異なるものが混在しているとされる。さらに平川 (2002) ^[22]は、Wynne (2001) ^[126]を基に危害の内容と発生確率が共に知られているものをリスク、発生確率が分からないものを狭義の不確実性と定義し、定量的に評価できるのはここまでとしている。本研究で扱う低平域の広域排水リスクに関わる不確実性の種類を考えると、大きくは水文・気象分野の観測に関するものから、解析モデルの構造、計算手法に関するものなどが存在する。一例として池田・盛岡 (1993) ^[26]に習いそれらの不確実性の性質の分類を試みると **Table 5.1** のような結果が考えられ、その性質が多岐にわたることが伺える。

5.3 不確実性を含む広域排水リスクの評価手法

5.3.1 評価対象とする不確実性

上記のように、広域排水のリスク評価に影響する不確実性には様々な項目が挙げられる。その中で、解析モデルや観測値の不確実性は当然存在するが、それらに比べて結果に与える影響が特に大きいと考えられる (例えば Kay et al, 2009) ^[38]気候変動予測が備える不確実性を本研究での評価対象とした。具体的には、GCM の種類や計算初期値の影響に起因する複数の気候シナリオ間に存在する不確実性 (道広ら, 2011) ^[67]に的を絞った。ただし、後述する不確実性の性質を確率分布で表現しリスク評価に使用する手法は、**Table 5.1** に示す他の様々な項目にも応用可能である。

将来気候を予測する数値モデルは、モデル構造に限界があり、気象現象のカオス性も完全に表現できないことから、計算初期条件がわずかに違うだけでも、評価や予測値に最終的には大きな差を産む結果となる。この初期値やモデル構造がもたらす不確実性を考慮するため、同一モデルから出力された複数気候シナリオを用いるアンサンブル予測や、複数の異なるモデルからの出力を利用するマルチモデルアンサンブル予測が行われている。このアンサンブルデータは気象予報等で用いられる他、よりロバストな水利施設管理を目指して中長期的なダム運用への活用や (例えば野原, 2009) ^[80]、短期

Table 5.1 広域排水リスクに関わる不確実性の種類とその分類例

Item	Uncertainty	Trigger	Uncertainty type
Observation of climate	Accuracy of observation	Accuracy of observation equipment, Spatial distribution of rainfall, Discharge and water level, Data period etc.	(b), (c)
	Rules of data analysis	Threshold of heavy rainfall extraction	(b), (e)
	Error of stochastic analysis	Types of the extreme distribution	(a), (c), (d)
	Characteristics of rainfall	Climate change impact	(b), (c)
Climate change projection	Difference of climate scenario	Types of GCMs, Types of RCP scenarios, Constraint of initial values etc.	(c), (d), (e)
	Resolution of GCM	Generation of regional climate events	(a), (e)
	Intensity and patterns of rainfall	Climate scenario, Chaoticity of climate	(b), (c), (d)
Flood Analysis model	Algorithm of analysis model	Design of the model, Calculation method etc.	(d), (e)
	Influence of input data	Effect of initial values, Temporal-spatial distribution of data, Variety of information for analysis etc.	(b), (c)
	Spatial scale of an areal model	Accuracy of elevation data, Modeling of drainage system, Changes of land use	(c), (e)
Damage on rice	Accuracy of reduction ratio of rice	Error of the scales, Timing of flooding, Accuracy of flood analysis etc.	(b), (c)

Classification (Ikeda et al. 1993): (a) Probabilistic event ; (b) Incidental event ; (c) Unknown event ; (d) Crucial problem ; (e) Negotiable problem

イベントである洪水のリアルタイム予測等への活用（例えば渋尾ら，2014）^[102]が進められている。また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（2015）^[8]において，高解像度の全球モデル（60km メッシュ）と日本周辺の地域気候モデル（20km メッシュ）によって多数のアンサンブル実験を行った d4PDF（database for Policy Decision making for Future climate change）データも公開され，さらに多くのアンサンブルメンバーを用いて気候変動影響予測や適応策の検討が開始され始めた。これらに共通するのは，予測が困難な将来気候について，多数の気候シナリオを用いることでサンプルを増やし，その結果の集合を統計的に処理して気象現象の不確実性の理解や対応策の議論に役立てようとする点である。

5.3.2 気候変動リスク評価のための豪雨データの発生方法

対象とする気候シナリオ間の不確実性を評価するには，前述のように多くのアンサンブルデータを収集し，そこから対象リスクを求め統計処理を施す手法が一般的である。しかし，多数の気候シナリ

データを収集すると、それぞれに必要な範囲の切り出しやバイアス補正等の処理が必要となる他、データ容量が膨大となる面からみても扱いが容易ではない。特に本研究のような極端なイベントを対象とする場合は、豪雨だけを効率的に入手できれば処理も容易となり便利である。そこで本研究では、収集した気候シナリオ間に含まれる不確実性を反映させた多数の豪雨データを模擬発生させ、最終目的となるリスク評価に用いる手法を提案する。ここではまず、気候シナリオからいくつかの豪雨特性値を抽出し、その値の組み合わせでシナリオ毎の特徴を表現する。さらにこの特性値のバラツキを気候シナリオ間の不確実性として扱い、それぞれの値の出現確率を確率分布で定義する手法を提案する。この分布に従って選択した特性値を組み合わせると多数の疑似気候シナリオが生成でき、その下で模擬発生させた豪雨データのグループを多数得ることができる。この模擬発生には3章での開発手法を援用することで、効率よく豪雨データを得られる。

5.3.2.1 必要パラメータの抽出と確率分布の当てはめ

- 1) まず様々な GCM 出力より、可能な範囲で多数の気候シナリオを収集する。収集数を x とし、全てのシナリオは重みを付けることなく等価に扱う。次にリスク評価のための期間を y 年とし、シナリオのデータ期間内から気候変動による影響を見るための評価期間を設定する。
- 2) それぞれの評価期間で、気候シナリオ毎に閾値を超える豪雨イベントを抽出し、その特性（具体的には次項）のバラツキをシナリオ間の不確実性を示すものとして取り扱う。求める特性値は、抽出豪雨の①年平均発生回数 $\lambda_{j,i}$ 、②豪雨量の平均値 m_i と③豪雨量の標準偏差を平均値で除した変動係数 CV_i の3つとする。ここで、 j は月を示し ($j=1,2,3,\dots,12$)、 i は収集したシナリオ No. を表す ($i=1,2,3,\dots,x$)。①は模擬発生法の豪雨の発生頻度に関わるパラメータで、月別に求める。また②と③の値は豪雨量の決定に関係する値である。
- 3) 上記①～③の値は、設定したリスク評価期間でそれぞれ x 個ずつ得られるので、それらのデータを基に評価期間毎の確率分布形状を設定する。確率分布の種類は自由に選択できるが、ここではすべて正規分布に従うとした。例えば、ある評価期間で j 月の豪雨発生回数 λ_j を見たとき、 x 個の $\lambda_{j,i}$ はその不確実性から様々な値をとり、並べると **Fig. 5.1** のようになる。ここで $\lambda_{j,i}$ の平均 μ_j と分散 σ_j^2 を求めると、 λ_j が従う $N(\mu_j, \sigma_j^2)$ の正規分布の分布形状は以下の式(5.1)で表される。

$$f(\lambda_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_j^2}} \exp\left(-\frac{(\lambda_j - \mu_j)^2}{2\sigma_j^2}\right) \quad (5.1)$$

- 4) 同手順を1月から12月についてそれぞれ適用し、月毎にパラメータ λ_j の確率分布形状を決定する（合計で12個の分布を得る）。同様に、パラメータ m_i 、 CV_i についてもそれぞれ収集した x 個

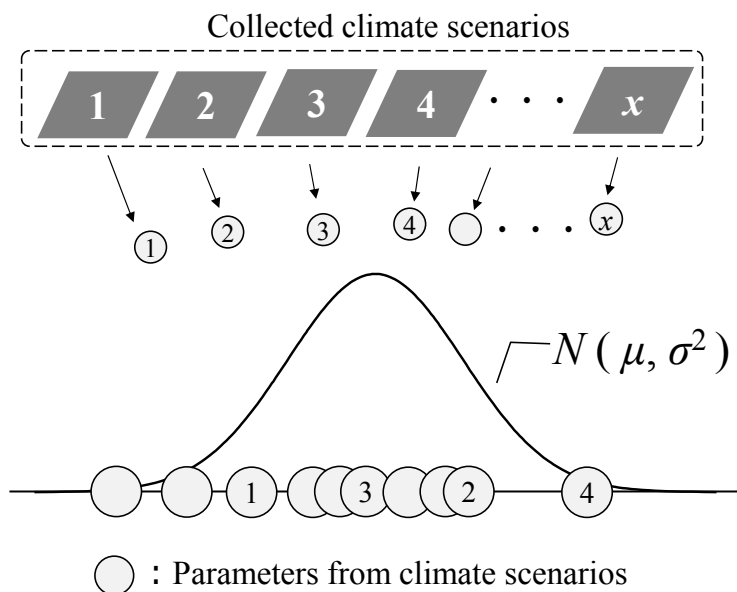


Fig. 5.1 気候シナリオにみる豪雨特性の不確実性に対する確率分布の当てはめ

の値から平均と分散を計算し、正規分布を当てはめることができる。ここで得たそれぞれの確率分布は、次に示すように模擬発生法に必要となるパラメータ値の決定に活用する。

5.3.2.2 気候シナリオの不確実性を取り込んだ豪雨グループの模擬発生手順

次に前項で得たパラメータ λ_j , m , CV の確率分布を活用し、評価期間内に発生する豪雨データのグループを多数発生させる手法について述べる (Fig. 5.2 に全体フローを示す)。

- 1) 模擬発生させる豪雨グループのセット数 z を決定する。計算を開始すると、パラメータの確率分布に従ってそれぞれの値がランダムに抽出され、疑似気候シナリオの特徴が決定される。次に、設定期間の1年目の1月から1ヶ月ごとに豪雨の発生回数を決定し、発生回数が0個の場合は次月へ、1つ以上発生した場合はそれぞれのイベントに対して豪雨量の決定へと進む。この処理が y 年目の12月まで終了すると、1つの疑似シナリオ下での豪雨グループの発生が終了となる。
- 2) ある年の j 月の豪雨の発生回数 n_j は、ポアソン分布に従い以下の式(5.2)で決定される。

$$f(n_j) = \frac{e^{-\lambda_j y} (\lambda_j y)^{n_j}}{n_j!} \tag{5.5}$$

ここで、 n_j は豪雨発生回数、 y はデータ期間 (year) である。次に、それぞれの豪雨イベントに対

して、式 (5.3) のガンマ分布に従い日単位の雨量強度が決定される。

$$f(x) = \frac{a}{\Gamma(h)} [a(x-v)]^{h-1} e^{-a(x-v)} \quad (5.3)$$

ここに、 v は原点パラメータであり、豪雨抽出に用いた閾値を設定することで発生させる雨量の下限値が定められる。また、 h は形状母数、 a は尺度母数パラメータであり、雨量平均 m と分散 σ^2 より以下の式 (5.4)、(5.5) で得られる。

$$h = \frac{(m-v)^2}{\sigma^2} \quad (5.4)$$

$$a = \frac{m-v}{\sigma^2} \quad (5.5)$$

ここで用いる分散 σ^2 は、模擬発生法に入力された m と CV より以下の式 (5.6) で変換できる。

$$\sigma^2 = (CV \times m)^2 \quad (5.6)$$

- 3) 1セット目の模擬発生が終了すると、次セットに進む。この時、1セット目で確率分布から設定した全てのパラメータを同分布からランダムに選びなおし、疑似気候シナリオの特徴を再設定して模擬発生を開始する。
- 4) この手順を繰り返し、豪雨グループが設定した z セット発生されると一連の手順は終了となる。リスク評価期間を複数設定した場合は同手順をそれぞれの期間毎に実施し、各期間で z セットの豪雨グループを得る。さらに、異なる RCP シナリオに基づいた気候シナリオを収集した場合は、RCP シナリオ別に上記手順を適用する。

以上の手順で得た z セットの豪雨グループは、基となる疑似気候シナリオの特徴が異なるため豪雨の発生個数や雨量強度の特性が様々である。さらにその疑似気候シナリオは GCM の気候シナリオ間の不確実性を反映させて決定しており、その下で得られたデータは基となる気候シナリオの不確実性が取り込まれている豪雨データ群とみなすことができる。本手法によって、多数の気候シナリオを用いたアンサンブルメンバーとしてリスク評価に用いることで、気候シナリオの影響によるリスクの不確実性を評価できる。

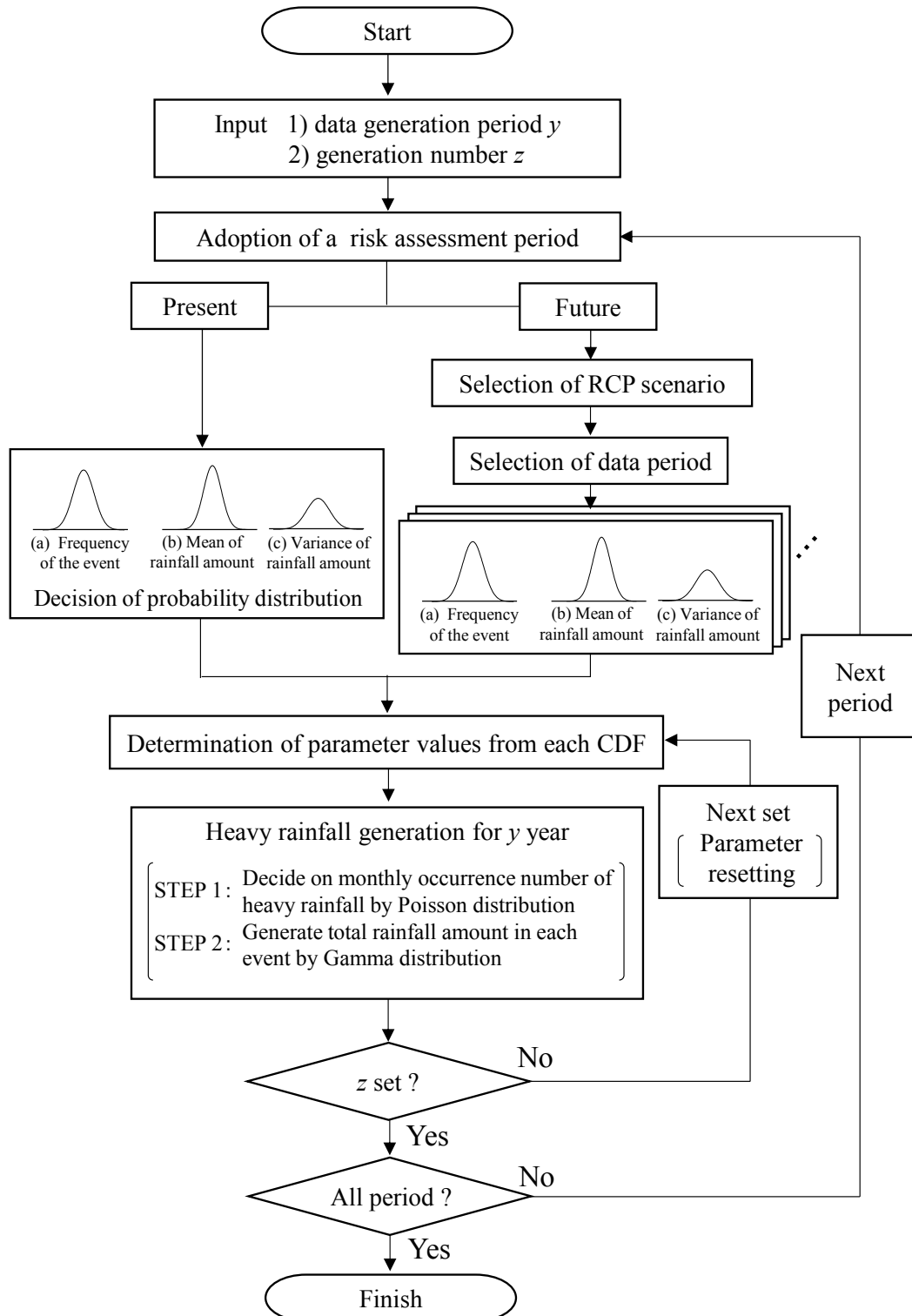


Fig. 5.2 気候シナリオの不確実性を考慮した豪雨グループの模擬発生フロー

5.3.3 広域排水リスクの評価手順

5.3.3.1 豪雨グループからの確率雨量の算定方法

前項で発生させた豪雨データの情報をリスク評価における入力雨量に活用するため、得られた z 個の豪雨グループのそれぞれから確率雨量値を算定する。この算定には、年最大値に対して Gumbel 分布のような極値分布を適用する手法（年最大値法）が一般的であるが、この手法では1年で1つのサンプルしか得られず、データ期間が短い場合などには使用できるデータ数が少なくなるといった課題がある。一方、ここで模擬発生させたデータは毎年の最大雨量では無く、定義したようにある雨量閾値を超える豪雨の集合である。このようなデータ系列には、一般化パレート分布などを用いて極値を推定する POT (Peak Over Threshold) 理論が適用できる（例えば星, 1998 ; 近森, 2012）^[24,6]。よって本研究では、発生させた豪雨グループに対してこの POT 理論を適用することとし、確率雨量値を算定するために式 (5.7) の一般化パレート分布を用いた。

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left(1 - k \frac{x - \xi}{\alpha} \right)^{1/k-1} \quad (5.7)$$

ここで、 α は尺度母数、 k は形状母数 ($k \neq 0$) である。 ξ は位置母数であり、豪雨抽出の閾値から既知となる。なお、 $k=0$ の場合にはこの式は指数分布となる。これらの母数 α 、 k は、 z 個の豪雨グループ毎に L 積率法によって算定した値を採用した。上記の手法で推定された確率雨量値は豪雨グループ毎に結果が異なり、ある確率年を見ると z 個の推定値が得られその不確実性を Fig. 5.3 に示すような強度分布として表すことができる。これにより、対象とした気候シナリオの不確実性が確率雨量の推定値の不確実性へと変換され、リスク評価に不確実性をもたらす要因となる。本研究では、この手順によって得られる確率雨量の分布をリスク評価法への入力値として利用する。

5.3.3.2 豪雨の発生月および降雨波形パターンの設定

発生させた確率雨量値に対し、リスク評価法に適用するための必要情報として発生月と短時間雨量系列への変換による降雨波形を設定する。発生月の情報は、後述するリスク評価項目のうちの水田被害評価の際に、水稻生育時期に応じて適切な減収尺度を選択するために使用する。また降雨波形情報は、一連のリスク評価で行う洪水流出～排水解析モデルへの雨量入力のために必要となる。

まず豪雨の発生月の特性は、現在から将来にかけて時系列的に、あるいは気候シナリオを得た RCP シナリオ毎で変化する可能性がある。そこで、前項で発生させた豪雨グループ群の結果より、評価期間毎、RCP シナリオ毎で各月の発生頻度を整理し、その情報を活用する。さらにリスク評価対象とし

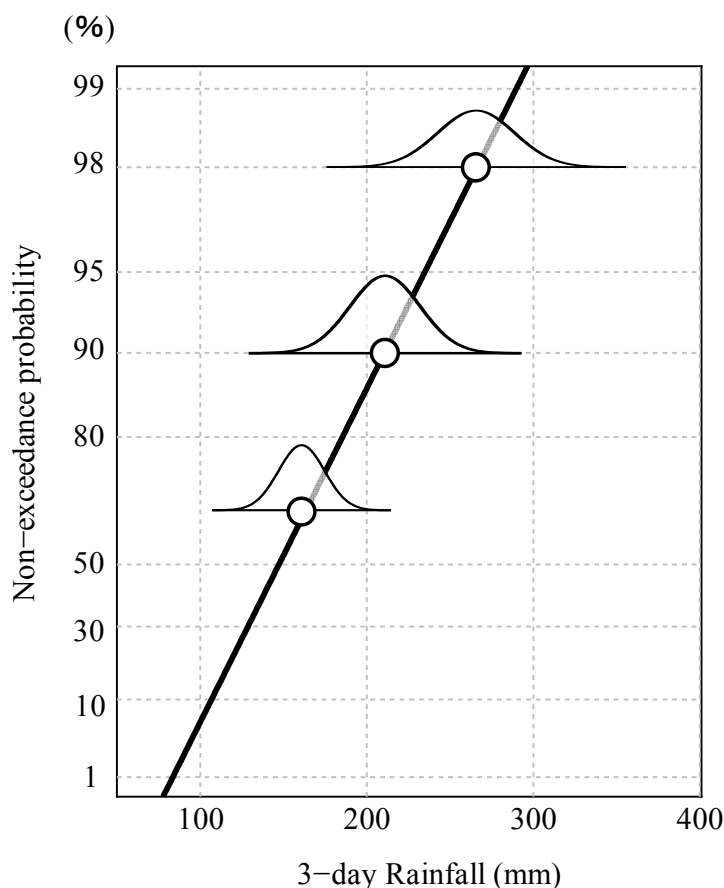


Fig. 5.3 不確実性を備えた確率雨量値の推定イメージ

ている水稻への影響は栽培期間にのみ発生することから、ここでは設定する豪雨の発生月を栽培期間に絞る。具体的には、対象地区等の農事歴等を参考に栽培期間を設定し、その期間中の各月の相対発生頻度を設定してこの割合に応じてそれぞれの確率雨量値の発生月を決定する。その後、決定した発生月に応じて適切な生育時期の水稻減収尺度を選定することで豪雨の発生時期の影響を考慮する。

次に降雨波形の設定手法については、3章で既に開発した短時間豪雨波形の発生法を利用する。具体的には Fig. 3.1 で示した模擬発生法の全体像のうち、時間雨量の配分と波形パターン生成に関する STEP3 と STEP4 を用いる。それぞれの確率雨量値は、まず STEP3 の手順により時間雨量系列に配分され、その後 STEP4 の処理で波形パターンが設定される。これにより、それぞれの雨量値に対して異なる波形が付与され、排水に対する降雨パターン変化の影響が考慮できる。なお、この手法を適用する際に時間雨量への配分と降雨波形の発生に係るパラメータの設定が求められる。本来はこの短時間雨量の特性についても気候変動や RCP シナリオの影響を取り入れる必要があるが、日雨量単位である収集シナリオからはこの値が算定できない。今後の対応として、気候モデルの出力を物理的にダウンスケールした WRF などの出力を利用することが考えられる。本研究では、すべての評価期間、RCP シナリオで3章において使用した観測値から得た値を設定した。

5.3.3.3 広域排水リスクの評価項目

リスクは、前述の方法で発生させた確率雨量値を4章で対象地区に適用した排水モデルに入力して得られる解析結果から評価する。ここでは、河川水位に注目した洪水リスクと、水田湛水によって引き起こされる水稻減収量に注目した水田被害リスクの2つを評価する。

まず洪水リスクでは、河川や排水路上で危険水位（氾濫危険水位、計画高水位など）が設定されている地点を対象とし、ある雨量値を入力した場合の水位ハイドログラフのピーク値とこの危険水位を比較する。ピーク値が危険水位を超過した場合を洪水発生と定義し、その超過確率（入力雨量数に対する超過数の割合）を洪水リスクとして評価する。一方で水田被害リスクでは、水田水深の出力から水稻の冠水状況と継続期間を抽出し、水稻減収量（または被害金額）を推定する。その際、豪雨の発生月の情報から水稻の生育時期を判断し、その時期に応じた減収尺度（Fig. 4.11 参照）を被害推定に利用する。このため、同程度の水田浸水が発生した場合でも豪雨の発生月によって被害の評価結果が異なる。減収尺度の生育時期は分けつ期、穂ばらみ期、出穂期、成熟期に分類しているが、穂ばらみ期と出穂期は冠水による被害特性が似ており、さらに時期も連続していることから、名称を出穂時期として両期間の平均減収率を用いることとした。尺度は完全冠水時のものを基本とし、出穂時期と成熟期で冠水状況が葉先露出と診断された場合は、完全冠水時の50%の減収率となると仮定した。

5.3.4 不確実性の取り扱いとその評価法

上記の手順によって、10年確率時などある確率年を対象とした時のリスク分布が得られるため、この分布をリスクの不確実性と定義する。この分布を現在から将来の評価期間毎に、またRCPシナリオ毎に明らかにし比較すると、気候変動の影響によるリスク変動傾向の評価が可能となる（Fig. 5.4）。そのリスクの分布形状の評価尺度として、平均値、中央値、最大・最小値などの基本統計量に加え、ここではValue at Risk（以後、VaR）および、期待ショートフォール（Expected shortfall, ES）の概念を導入する。両者は金融工学等の分野で良く用いられる概念で（例えばMacNeil et al, 2005）^[6]、対象期間内に発生するリスク X がある確率分布 F に従って発生するとしたときに、一定の確率（信頼水準） $\alpha\%$ （例えば95%や99%など）で発生しうる損失の値を VaR_α と表示する。ただし VaR_α は分位値であり、 $1-\alpha$ より小さい確率で発生しうるリスクである分布の裾野に対する情報が無い。ESはその情報を補うために導入するもので、 VaR_α を超えるリスク X の期待値を示した値である（ ES_α で表示）。

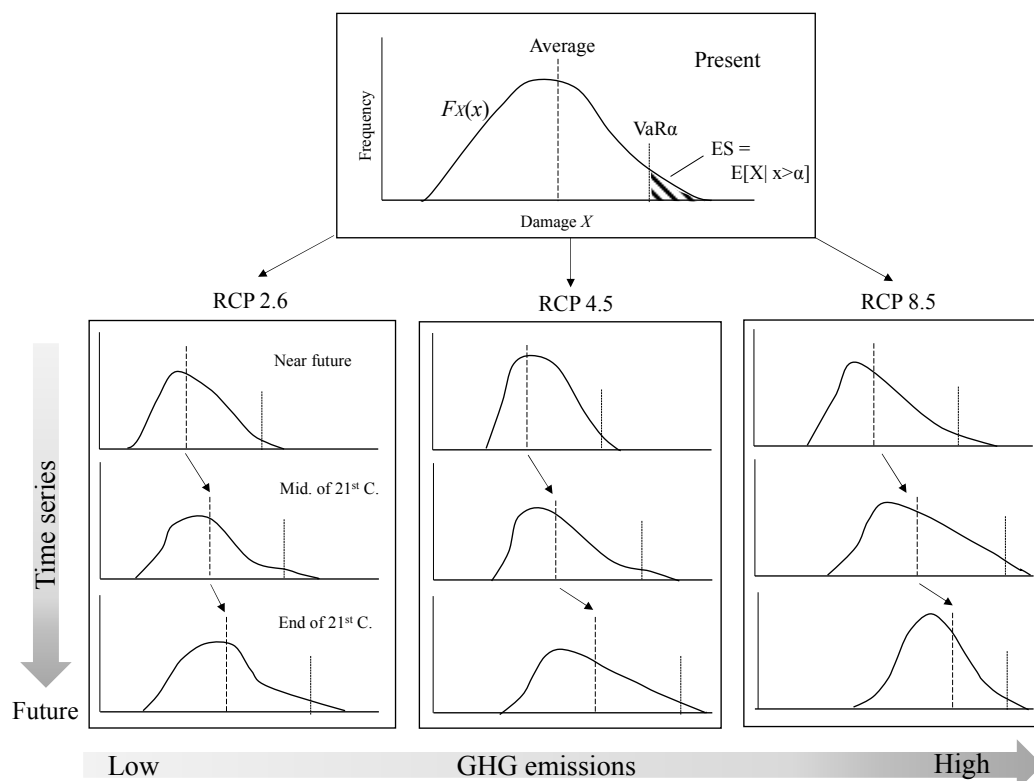


Fig. 5.4 リスクの分布変化による不確実性評価の流れ

5.4 従来法による広域排水リスクの評価例

ここでは、対象とした加賀三湖地区において、確率雨量を固定して広域排水リスクを評価する従来法での評価結果の例を示す。即ち、気候シナリオの不確実性は考慮していない結果である。

5.4.1 入力雨量と水田被害評価のための条件設定

リスク評価に使用する豪雨は2年確率（頻繁に起こりうる規模）から200年確率（稀に発生する極端規模）の範囲で10通りの確率年を設定した。2章で収集した対象地区の観測降雨資料を基に、Gumbel分布を用いてそれぞれの確率3日雨量を算出した（Table 5.2）。この10通りの雨量に対して、3章に開発した模擬発生法のうち雨量の時間配分—降雨波形の発生手法を適用し、時間的ダウンスケールを行った。その際、降雨波形の発生数を1つの雨量値に対して300パターンに設定した。この10通りの雨量規模についてそれぞれ300個の豪雨データをすべて排水モデルに入力し、得られた水田被害の評価結果を分析した。なお入力雨量の降雨期間は3日間に設定している。また、排水解析時の下流端境界条件である海水位は、対象地区の年間平均値である0.5mとし、解析期間中は一定値とした。また、計算初期値や諸条件は、それぞれの雨量入力毎にリセットし、すべての計算で同じ条件としている。

Table 5.2 従来法で使用した豪雨の再現期間とその雨量規模

Return period (y)	2	3	5	8	10	15	30	50	100	200
Rainfall amount (mm/3d)	141.0	163.6	187.8	210.4	220.4	238.2	268.1	290.0	321.9	350.9

5.4.2 降雨波形の変化に注目した広域排水リスクの評価結果

Fig. 5.5 に、入力雨量の超過確率と水稻被害の評価について柴山潟系統での結果を示す。ここでは同じ雨量規模でそれぞれ 300 個の結果を得たため、そのすべての結果の平均値と 95%信頼幅を図示した。また、同じ解析結果に対して出穂時期と成熟期の尺度を用いた結果を示している。図より、被害量の平均値は雨量規模と共に増加していくが、この地区では 30 年確率程度の雨量を超えると結果の傾きが変化し、それ以上の雨量では被害リスクが急激に高まることが示唆された。さらに降雨波形パターンの違いによって生じる被害量の信頼幅は雨量規模が大きくなるにつれ広がっており、100 年確率以上などの極端豪雨の際には降雨波形も被害規模に関わる重要な要因となりうるということが分かった。このことから、最悪規模の被害に繋がる降雨パターンを予め想定して防災・減災対策のための緊急時の対応法を議論するなど、事前の対応も重要といえる。一方、水稻被害量の推定結果は生育時期で大きく異なるため、豪雨の発生時期の情報も欠かすことができない。ここで評価した被害量は、地域の玄米取引価格（石川県では、例えば H27 年度産玄米の相対取引価格は 13,000 円/60kg 程度、農林水産省, 2016）^[88]等に乗じることで被害金額に容易に換算できる。その結果は、各種経済分析や治水事業における費用対効果算定等の基礎資料としての活用が考えられる。ただし、前述のように従来法を用いた本結果では、そもそもの被害の発生確率（即ち豪雨イベントの発生確率）が決定した値とされており、不確実性が考慮されていない。そのため将来の気候変動リスク評価等に用いるには十分でなく、課題が残されていた。この課題を解消するために、前節で示した手法によって豪雨の発生確率の分布形状を明らかにし、その不確実性を考慮する手法を提案した。

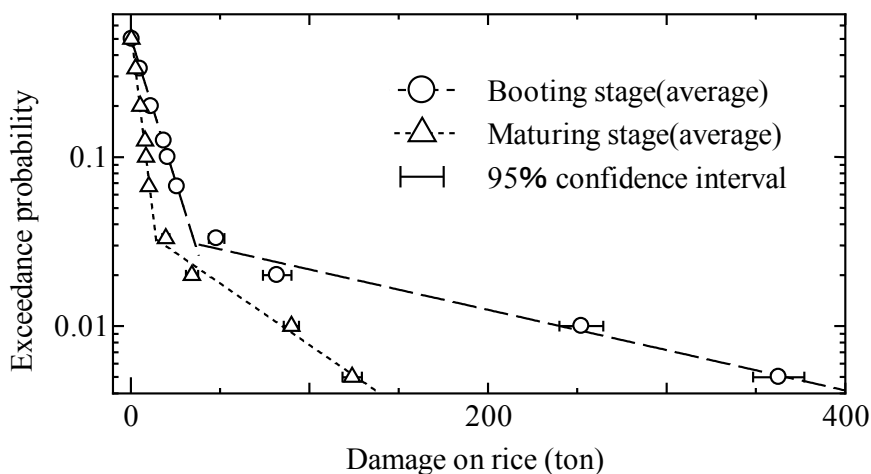


Fig. 5.5 雨量規模と水稻被害量の関係に見るリスク評価結果（柴山潟系統）

5.5 新たな評価方法の適用結果と考察

使用するデータは2章で収集・分析したGCMによる気候シナリオとし、現在期間は15シナリオ、将来期間はRCPシナリオ毎に11シナリオで（Table 2.3 参照）、バイアス補正済みのデータである。リスクの評価期間は、Table 5.3 に示すように現在が1期間に対して将来期間は時系列で3期間に設定した。また豪雨グループの発生数 z は1,000回、データ期間 y は評価期間と同様に25年間とし、将来期間に関しては3つのRCPシナリオ（RCP2.6, 4.5, 8.5）毎に本手法を適用した。豪雨量の発生に用いる式（5.3）で設定する原点パラメータ v は、本研究における豪雨の定義から全期間で70.0とした。また式（5.7）で確率雨量の算定に用いる閾値 ξ については様々な決定法が提案されているが（例えば Coles, 2001 ; 近森, 2012）^{9,6)}、ここでは上記のパラメータ v に合わせて70.0を採用した。その他、本研究の豪雨グループの模擬発生に用いたパラメータの一覧は、章末付録に記す。

Table 5.3 時系列でのリスク評価期間の設定

Year	Period name	(Abbreviation)
1981～2005	Present	(-)
2026～2050	Near Future	(NearF)
2051～2075	Middle of 21st century	(Mid21C)
2076～2100	End of 21st century	(End21C)

5.5.1 豪雨グループの発生結果と確率雨量の算定

上記の条件で発生させた豪雨イベントの数は現在期間では合計で約78,700個となり、豪雨グループの平均で78.7個、1年の平均で見ると約3.1個となった。それに対し、将来期間のRCP2.6の結果では約93,500～101,400個（データ期間の年平均では3.7～4.0個）、RCP4.5では89,400～109,600個（3.6～4.4個）、さらにRCP8.5では112,100～122,300個（4.5～4.9個）の豪雨が得られ、発生数には上昇傾向がみられた。この発生個数の結果を豪雨グループ毎に見ると、Fig. 5.6 が得られた。図は、それぞれの評価期間で1000個の豪雨グループの発生数を降順に並べて示している。ここから、時系列が将来期間になるほど、またRCPシナリオが高位になるほど豪雨の発生回数は増加することが明らかになり、その傾向は2章で明らかにした収集した気候シナリオの分析結果とも一致していた。次に、これらの豪雨を発生月毎に見て、水田への影響がある水稻栽培期間の発生頻度を比較した。ここでは、栽培期間を5月（田植え時期）～10月（収穫時期）の6か月間と設定した。この栽培期間中の豪雨発生率は、全体のうち現在期間では約76%、将来期間ではRCP2.6で70～74%、RCP4.5で68～72%、RCP8.5では66～69%となり、高位のRCPシナリオでは割合が減少傾向にあった。これは高位RCPシナリオの

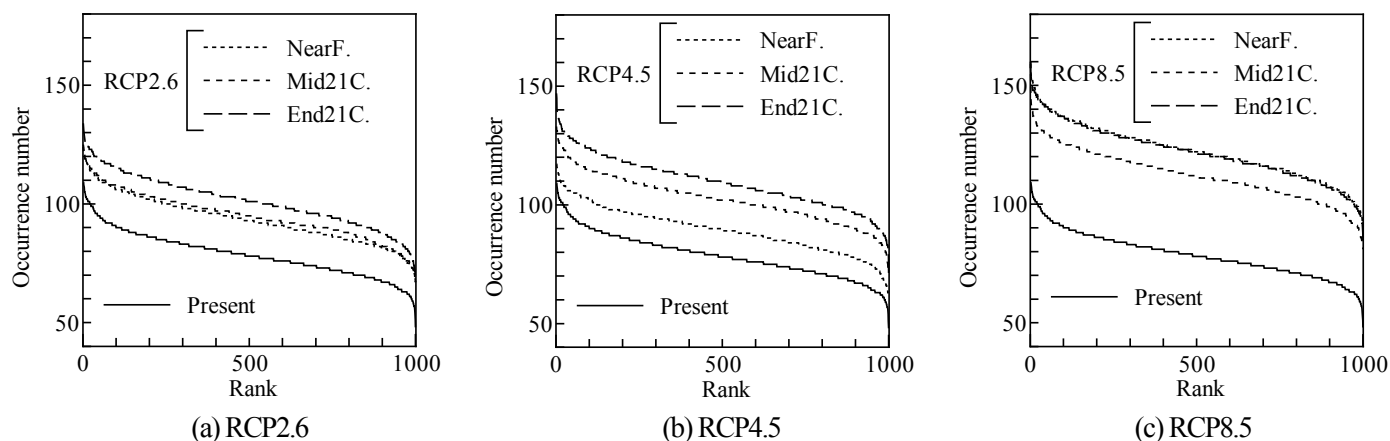


Fig. 5.6 各 RCP シナリオでの豪雨発生回数の模擬発生結果
(豪雨グループ毎の積算発生回数を降順に並べた結果)

Table 5.4 水稻の栽培期間中における豪雨の相対発生割合

Growth stage		Tillering stage		Booting / Heading stage		Maturing stage	
RCP scenario	Period	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.
Present		0.08	0.20	0.24	0.15	0.23	0.09
RCP2.6	NearF.	0.10	0.21	0.25	0.12	0.23	0.08
RCP2.6	Mid21C.	0.12	0.19	0.24	0.15	0.23	0.08
RCP2.6	End21C.	0.11	0.20	0.26	0.15	0.20	0.08
RCP4.5	NearF.	0.08	0.22	0.27	0.11	0.22	0.08
RCP4.5	Mid21C.	0.10	0.21	0.26	0.13	0.23	0.07
RCP4.5	End21C.	0.10	0.21	0.25	0.13	0.22	0.09
RCP8.5	NearF.	0.14	0.22	0.21	0.13	0.21	0.09
RCP8.5	Mid21C.	0.11	0.21	0.25	0.14	0.21	0.08
RCP8.5	End21C.	0.14	0.22	0.21	0.13	0.21	0.09

場合には栽培期間以外の時期にも豪雨発生頻度が上昇したためであり、前述のように発生回数自体は上昇していたことから、リスク減少に繋がるものではない。次にこの栽培期間を2ヶ月毎に分割し、水稻の生育時期と合わせて5-6月を分けつ期、7-8月を出穂時期、9-10月を収穫時期と設定した。この3つの生育時期での豪雨の相対発生割合をまとめると Table 5.4 が得られた。後述するリスク評価の入力となる確率雨量値のそれぞれに対してこの表に示す割合で発生月の情報を与え、生育時期に対応する減収尺度を選定し水田被害の推定に用いた。

次に、確率雨量値の推定結果について示す。ここで求める確率年は、頻繁に発生しうる規模である2年、3年、5年、8年確率、また通常の排水計画基準に用いられる10年確率の値、それを超える15年、20年、30年（農地防災事業での適用範囲）、50年、100年（河川計画基準規模）、さらに極端な規

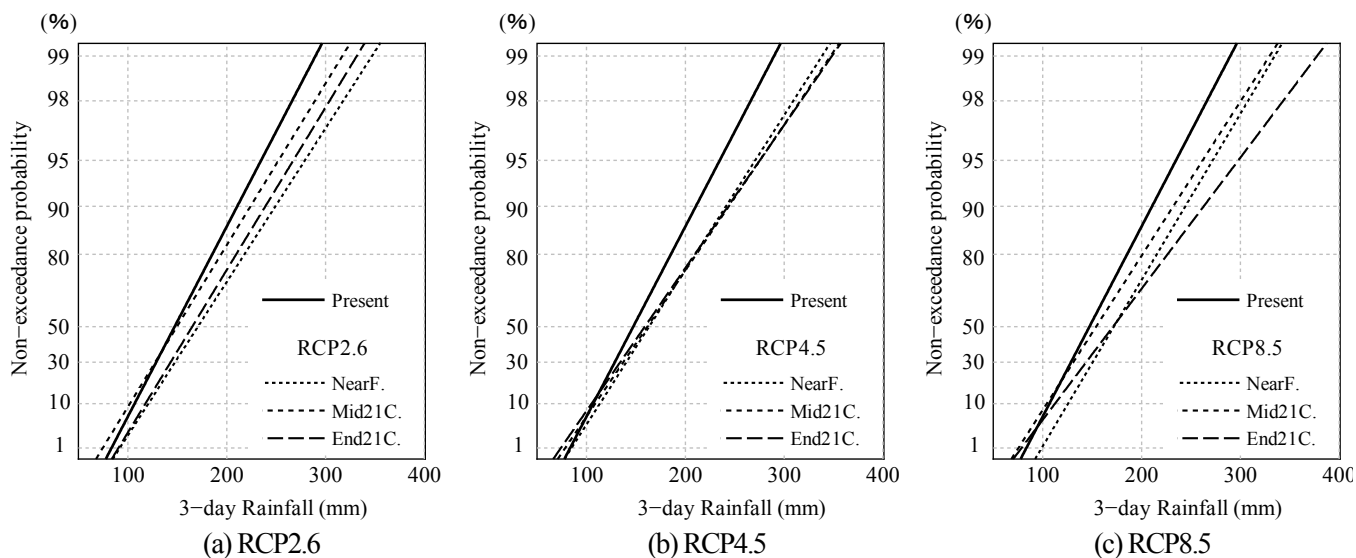


Fig. 5.7 豪雨グループから得た評価期間毎の確率雨量の平均

模として200年、500年、1000年確率までの13通りとした。まず、リスク評価期間毎に1000個得ている豪雨グループのそれぞれで上記13通りの確率雨量値を求め、その平均値を比較すると、Fig. 5.7が得られた。その結果、将来期間は全てのRCPシナリオ、評価期間で現在期間よりも確率雨量が増加すると予測された。その中から例えば10年確率の雨量値に注目すると、現在期間では1000個の平均が約220mm/3dとなり、これは対象地区の観測資料から推定した値と同程度の規模であった。次にその値について現在から将来期間の増加割合をみると、RCP2.6では1.06倍から最大で1.19倍、RCP4.5では1.15～1.16倍、RCP8.5では1.10～1.25倍となっていた。雨量に換算すると、10数mmから最大で50mm以上の増加となった。将来的にこの傾向が現実のものとなる場合には、各種計画で現在使用されている基準雨量値は過小評価になる可能性があるため、定期的に見直す必要がある。

次に推定された確率雨量値をグループ毎に個別に見ると、同確率年でも異なる結果が示され、気候シナリオの不確実性を考慮した確率雨量の発生頻度分布を明らかにすることができた。そのうち、10年確率に注目した結果をFig. 5.8に示す。それぞれの図より、平均値付近の出現確率が高いものの、例えば現在期間では最大で400mmを超え、最小では100mmを下回るなど、雨量値が幅広く分布していた。また将来期間はその分布形状が変化しており、前述した平均値の上昇に加え、分布の裾が右に移動し大きな雨量に発生しやすくなることが示された(RCP8.5シナリオでは最大で570mm程度が発生)。このように、本章の提案手法によって気候シナリオの不確実性を取り入れた豪雨グループを多数得ることで、そこから推定される確率雨量の不確実性を明らかにすることができた。

ここで得られたすべての雨量値は、5.3.3.2で記したようにそれぞれ発生月と降雨波形パターンの情報を与え、短時間単位の雨量系列へと変換した。このデータを、低平農地域の排水解析とその出力への水稻減収尺度の適用で構成される一連のリスク評価手法(4章で提示)の入力値として用い、次に示す広域排水リスクを評価した。

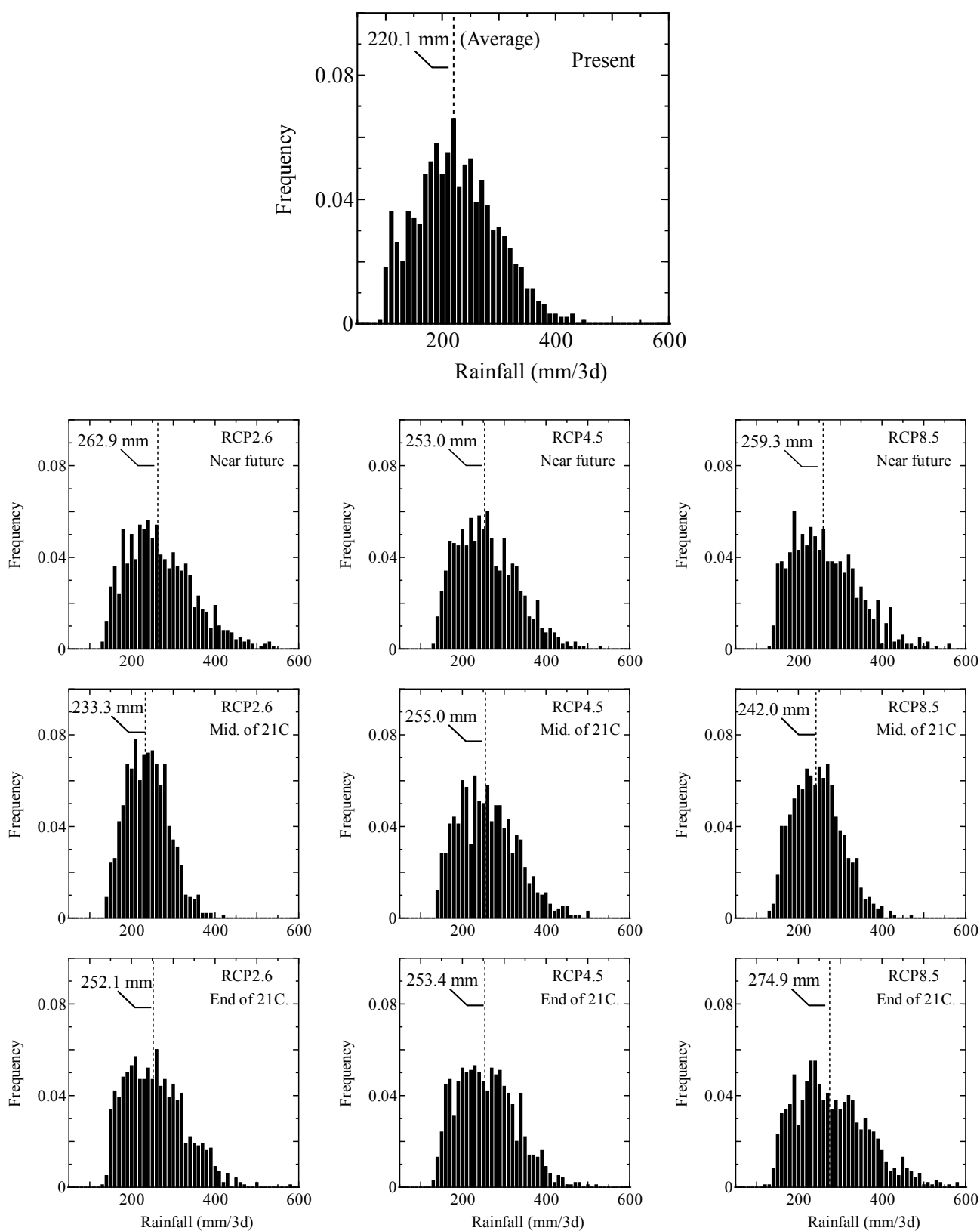
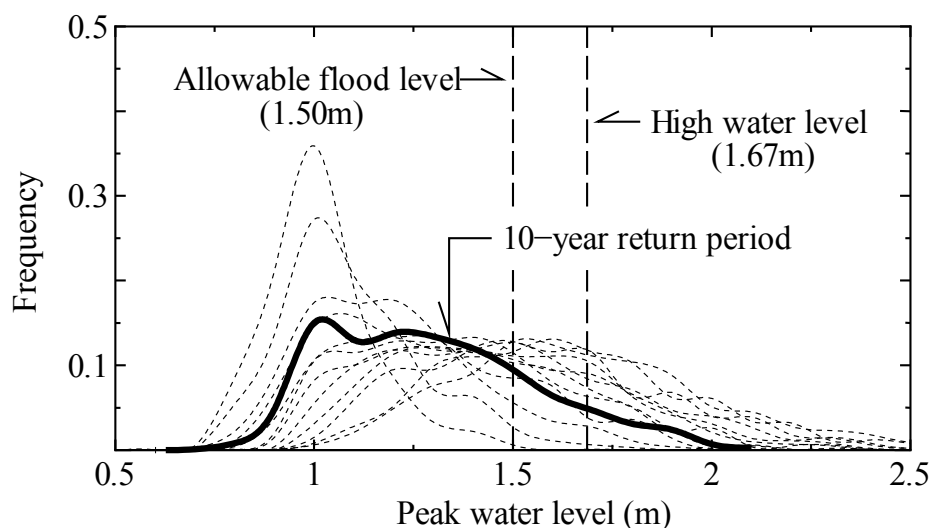


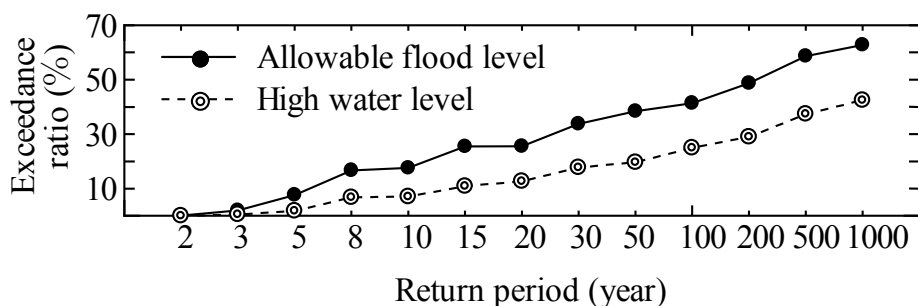
Fig. 5.8 気候シナリオの不確実性を考慮した確率雨量の発生頻度分布 (10年確率雨量の例)

5.5.2 河川水位にみる洪水リスクの評価

洪水リスクの評価では、河川の解析水位に注目した評価を行った。対象とするのは、対象地区内で流域からの排水が集中し、防災上重要なポイントとなっている柴山瀉地点とした。ここではまず、現在期間の雨量値を用いた結果を示す。推定した確率雨量値の全てを用いた解析結果より、対象地点でのピーク水位を抽出してその出現分布をまとめると **Fig. 5.9** が得られた。図の(a)に、13通りの確率年の代表として10年確率時の結果を太線で示した。これより、同じ確率年であっても **Fig. 5.8** に示したように雨量の強度が分布しているため、解析結果であるピーク水位は幅を持ち、雨量と同様に結果が広く分布していた。例えば10年確率時のピーク水位は平均的には約1.25mであったが、最大では2.00mを超える場合もあった。これは、確率雨量の推定に見る不確実性が、リスク評価のための解析手法を介してピーク水位の不確実性へと変換された結果といえる。このピーク水位の分布から、対象地点で



(a) Distribution of peak water level



(b) Exceedance probability of flood water level

Fig. 5.9 柴山瀉地点におけるピーク水位の分布と危険水位の超過割合 (現在期間の結果)

設定されている氾濫危険水位 (1.50m) と計画高水位 (1.67m) の超過割合をそれぞれ算定し、洪水リスクとして評価した。まず氾濫危険水位では、豪雨の再現年が3年以下の場合の超過割合は0~2%程度であり、この程度の規模では洪水リスクがほぼないことが分かった。しかし5年確率以上の規模になると雨量の増加に伴い徐々に超過割合が上昇していき、10年確率規模では洪水リスクが約18%、50年確率規模では約38%、200年確率規模では49%となった。同様に、計画高水位の超過割合を見ると、こちらは10年確率の雨量で約7%、50年確率規模では20%、200年確率規模では29%であった。同様の手法を将来期間の気候シナリオに当てはめると、将来期間における洪水リスクが推定できる。例えば10年確率雨量時の氾濫危険水位の超過割合は、RCP2.6では最大31%、RCP4.5で31%、RCP8.5では37%に達するなど、現在期間から2倍近くまで上昇することが示された。

このように、本研究によって雨量規模と洪水リスクの関係を評価する手法が開発された。今後の展開として、例えば都市域を含めた洪水・氾濫解析が可能な数理モデルをリスク評価モデルに据えることで、本研究では対象としていない宅地被害の確率評価やその将来変化予測への活用が期待される。さらに、上流域のダム操作や農地での雨水貯留等の水管理を導入した場合の洪水リスク低減効果を評価するなど、流域水管理手法の検討にも応用が可能と考えられる。

5.5.3 水田被害リスクの推定と評価

次に、水田浸水に伴う水稲被害のリスクを評価した。確率雨量値には、前述のようにそれぞれ異なる降雨波形と **Table 5.4** に示した割合で発生月の情報を模擬発生させ設定し、排水解析の入力に用いた。その出力から流域に広がる浸水被害の発生水田を抽出し、発生月の情報から選択した適切な時期の減収尺度を適用してイベント毎に水稲の被害評価を実施した。その評価結果の中から、現在期間の確率雨量を使用した場合に得られる雨量再現年と水稲の被害量の関係を **Fig. 5.10** に示す。図は対象流域全体で発生した水稲の減収量を示しており、その中から排水計画基準に用いられる10年確率、農地防災事業で対象となる30年確率、さらに一級河川等の河川計画で整備基準となる100年確率での結果を詳細に見た。被害量については、洪水リスク評価と同様に入力豪雨量の強度分布が影響している他、豪雨の発生月（水稲の生育時期）の不確実性が考慮されており、使用する減収尺度によって被害評価結果に大きな幅が出ることになる。分けつ期と成熟期は類似して被害が小さいが、出穂時期と判定された場合は極端に大きい被害が発生するため、図の結果はこの2つの分布を合成した形状を示している。そのため、例えば10年確率の結果では、平均的には約832tの被害量が発生したが、その幅を見ると最大では約2,450tから最小で50tまでと広く分布していた。またその分布形状から、出現頻度が高い階級は500t以下の範囲であり中央値は520t程度であることから、平均値は出穂時期が選択された場合に出現する大きな評価値に引っ張られた結果といえる。また雨量が30年確率になると、平均値は1,000tを超え、最大で3,500t程度の被害が発生した。さら雨量が増加し100年確率になると、10年確率では9%程度しか発生しなかった2,000t以上の被害が約21%と倍以上の発生確率になった。

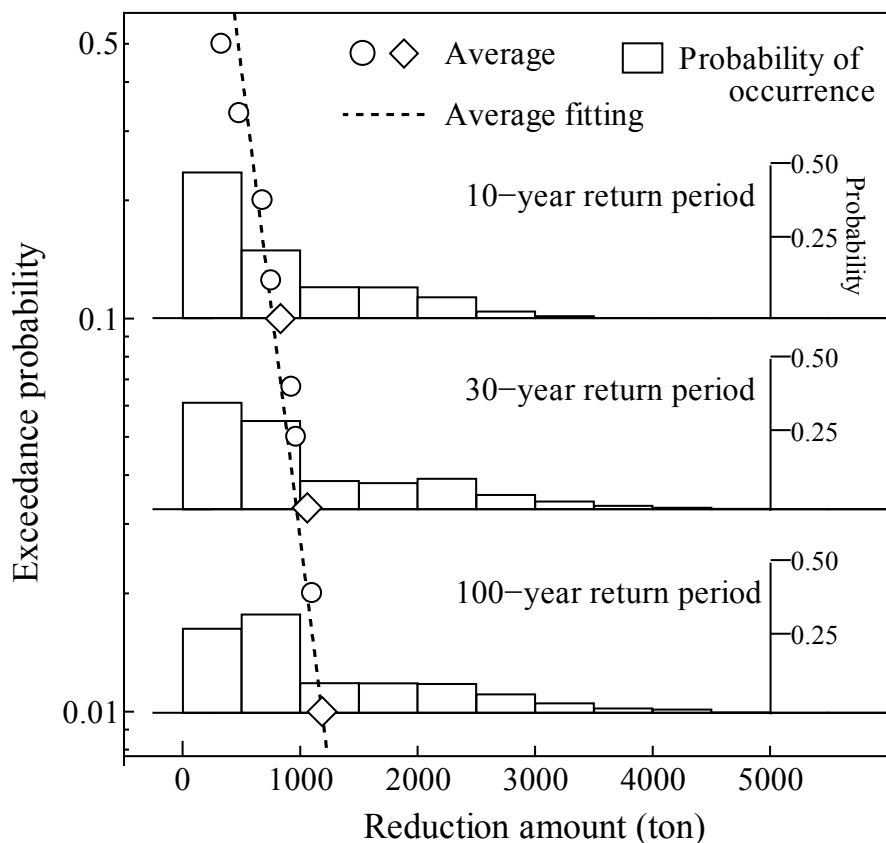


Fig. 5.10 豪雨量の強度と発生月を考慮した水稻被害リスクの不確実性 (現在期間における10年, 30年, 100年確率の例)

これらの結果のように、リスクの持つ不確実性の分布情報を解析により得ることで、平均的な値に加えて想定すべき最大級の被害量やそれぞれの被害規模の発生頻度を評価できた。

また、このときの被害金額の分布形状をみると Fig. 5.11 が得られた。この図は Fig. 5.10 を玄米の単位価格を用いて金額に換算した現在期間の結果である。玄米単価は年毎の玄米流通量等によって多少の増減があるが、ここでは、国内における27年度産の玄米の相対取引価格が60kg当り約13,000円であったことから (H28年1月の時点, 農林水産省政策統括官付農産企画課, 2016) [88], この値を単価に用いた。図は被害量と同様に2山のピークをもつ分布形状となり、豪雨の確率規模が変化するとその分布形状が変化している。この被害金額の分布を比較するリスク尺度として、右側の裾野部分に注目した VaR_α と ES_α を算定した。信頼水準 α の値には、通常用いられる99%や90%に加え、平均的な結果も見ようことを目的に50%を設定した。この VaR_{50} のときの値は分布の中央値を指し、 ES_{50} は50%の確率で発生する中央値より大きい結果の期待値を示すことになる。まず、排水施設規模の決定に関わる10年および30年確率で VaR_α を比較すると、 VaR_{50} では10年確率時の約113百万円に対し、後者ではその1.26倍である142百万円に増加しており、同様に VaR_{90} と VaR_{99} では1.21~1.27倍となっていた。さらに100年確率では10年確率と比較して1.30~1.42倍の増加となっており、確率年毎の分

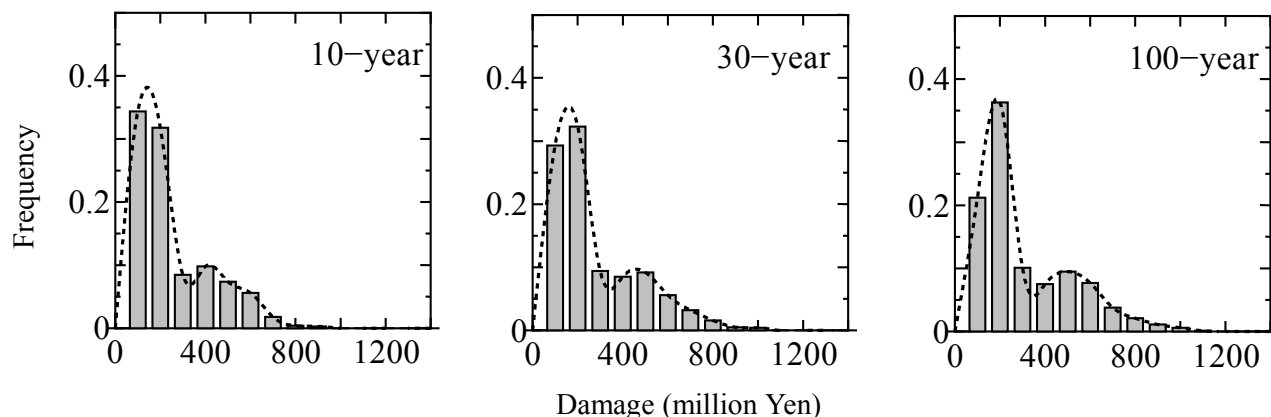


Fig. 5.11 気候シナリオの不確実性を考慮した被害金額の分布

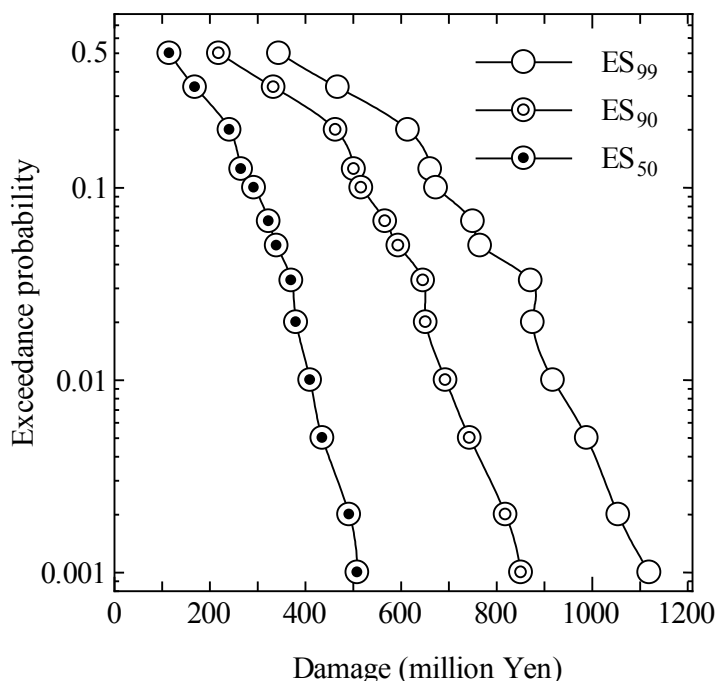


Fig. 5.12 雨量規模と水稻被害金額の期待ショートフォールの関係 (現在期間の例)

布形状の変化が捉えられた。またそれぞれの ES_a の値を各確率年で推定した結果を見ると (Fig. 5.12), VaR_a と同様に雨量規模の上昇に伴って ES_a の値が上昇することが分かった。例えば 10 年確率の ES_{50} は約 292 百万円, ES_{90} は 516 百万円, ES_{99} は 673 百万円と評価され, 30 年確率はその 1.25~1.29 倍, 100 年確率では 1.34~1.40 倍となった。このように, ある確率規模の雨量を対象としたときの具体的な被害金額とその発生確率がリスク尺度として示されることで, 排水システムの整備に係るハード対策費用とその防災効果の具体的な比較や, 反対に農地を遊水地的に使用するようなソフト対策の効果を評価でき, リスクへの対応策を検討するための議論に役立つ情報が得られる。

5.5.4 広域排水リスクの将来変化とその不確実性の評価

現在期間と同様に、各 RCP シナリオにおいて将来期間の水田被害リスクとその不確実性の評価を実施した。その代表として、最も気候変動の影響が大きいとされる RCP8.5 シナリオ下における 10 年確率時の水稲被害量の推定結果を Fig. 5.13 に示す。現在から将来にかけての分布は重なる部分も多いものの、出現頻度のピーク位置は現在で 0–500t であったものが 21 世紀末には 500–1,000t へと移動していた。同様に平均値についても徐々に増加し、現在期間の約 832 t から直近の未来である 2026–2050 年の範囲でも約 133t 増加して 965t となり、21 世紀末では 200t 以上増加して 1,050t となった。この 21 世紀末の平均値は、現在期間の 30 年確率の雨量分布を用いた場合の平均値とほぼ同等であった。さらに最大規模の被害を見ると 21 世紀末では 4,500t となるなど、現在期間より 1,000t 以上も大き

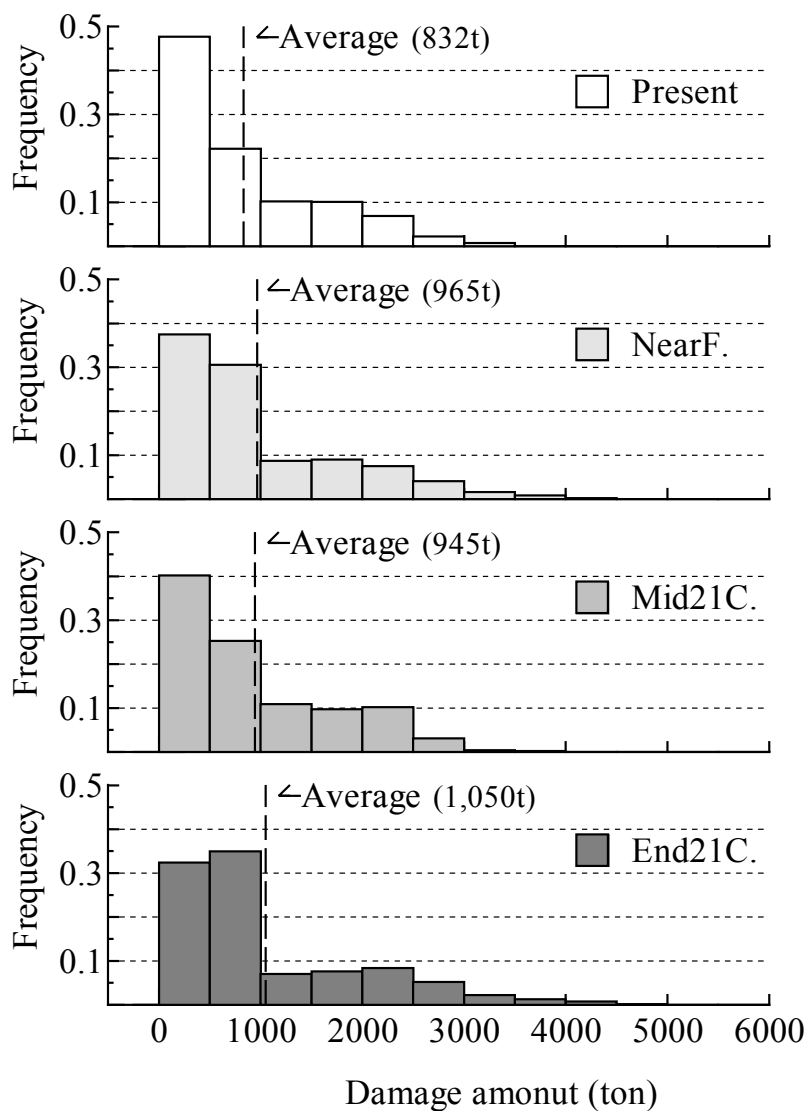


Fig. 5.13 水田被害リスクの不確実性に見る分布形状の将来変化 (RCP8.5 シナリオにおける 10 年確率の例)

な値が発生した。ここで、この被害の平均値を見ると近未来から21世紀半ばにかけて僅かに減少していた。これは入力雨量の影響であり、**Fig. 5.8**に示すRCP8.5の21世紀半ばの期間は近未来と比較して10年確率の雨量値の分布幅が狭く、平均もやや小さいことに起因している。しかし一方で、両期間の平均値より大きい1,000t~2,500tの中程度の階級では、21世紀半ばの方が近未来よりも発生確率が上昇していた。さらに100年確率など確率規模が大きくなると、被害の平均値においても21世紀半ばの方が大きくなると予測されており、この時期にリスクが減少すると単純にはいえない。

次に、リスクの将来変動の傾向を分布形状の変化で評価するため、この水稻減収に伴う被害額のES₉₀に注目した。被害額の算定では現在期間と同じ玄米単価を利用し、単価は将来も変化がないと仮定した。ここでは、3通りのRCPシナリオのそれぞれで近未来、21世紀半ば、21世紀末のES₉₀を算定し、それぞれの結果を現在期間のものと比較して値の変化割合で評価した。代表して10年確率時における結果を見ると(**Fig. 5.14**)、まず近未来の期間では、どのRCPシナリオでもリスク増加が予測されており、その範囲は現在の1.15~1.18倍程度でRCPシナリオ間での差は大きくなかった。次に21世紀半ばでは、RCP2.6と8.5では一転して近未来よりも10年確率時のリスクが下がった。RCP8.5で下がった理由は前述の通りであるが、RCP2.6についても同様に雨量値の分布の影響が表れた結果である。さらにRCP2.6では、現在期間よりも低く評価された(0.99倍)。21世紀末になると再度リスクは上昇

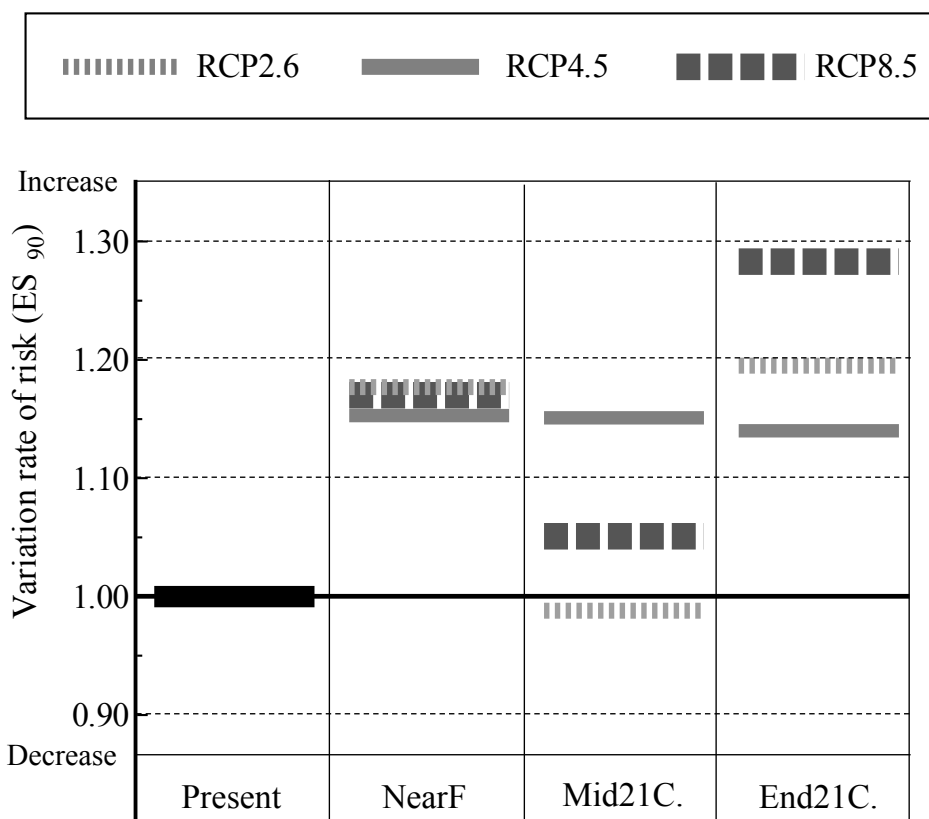


Fig. 5.14 現在期間からみた将来のリスク変動割合
(10年確率雨量における期待ショートフォールES₉₀での比較)

し、RCP8.5では現在の1.28倍にもなった。RCP2.6でも1.20程度まで上昇している。ただしRCP4.5は、近未来から21世紀末まで入力雨量値の強度分布が類似して平均値や分布形状に大きな変動がなかったため、最終結果に見るES₉₀のリスク尺度も一貫して安定して時系列での大きな変動はなかった。これらの結果が示すように、本章の手法によって気候変動予測におけるシナリオの不確実性を雨量の不確実性へと変換し、さらにその結果を水田被害リスク評価に反映させることができた。またリスク変化の評価指標としてリスクの不確実性を示す分布形状の特徴を取り出し比較することで、RCPシナリオ毎に異なるリスクの将来の変動傾向を時系列で示すことができた。

5.5.5 提案手法のさらなる活用場面と展開

本章で開発した広域排水リスクの評価法は様々な不確実性要因に対して応用できるが、ここでは代表して気候シナリオの備える不確実性に注目し、それを原因とした排水リスクが持つ不確実性を評価した。まず洪水リスクでは、これまではある1つの計画基準降雨に対して安全/危険度を決定的に判断していたものが、雨量の発生確率の不確実性を評価してリスク算定に用いることで、危険度合いを確率的に評価できることを示した。これにより、仮に計画規模以下の豪雨でも洪水の発生リスクがあることが示され、さらに強大な規模の豪雨発生時におけるリスクを定量的に認知することが可能となった。同様に水田の被害リスク評価では、豪雨規模と被害量・金額の関係とともにその分布から被害期待値を評価することで、地域の排水能力向上のためのハード対策の費用便益や、農地を活用したソフト対策の被害補償に関連する情報を提供可能となった。これらの手法やその結果は、低平農地域において豪雨に対する様々な防災・減災対策を計画するために、広く活用が期待される。

現状では、気候変動予測の不確実性が大きいと考えられているため、水利施設を対象とする農業農村整備事業の計画では従来の設計手法に頼らざるを得ず、そのための必要資料として過去の水文・気象観測資料のみが利用されている。しかし、これでは将来起こりうる気候変動シナリオを計画に反映させることはできず、数十年～100年先を見越した長期的な目標が立てられない。そのため、実際に問題が生じてから対応する対処療法的な処置を取らざるを得ず、どうしても対応が後手に回ることになる。本章に示す一連の手法によって、現状で起こりうる平均的な被害規模から極端規模の被害までを確率的に評価でき、さらに将来のリスク変動を時系列で示すことができる。この情報を活用すると気候変動への対応に向けた中・長期的な視点で達成すべき水利施設規模の目標を明確に設定できる。またその目標は気候変動シナリオの更新等によって柔軟に見直すことができ、社会情勢の変化にも対応可能である。その際に選択するRCPシナリオは、将来目指す気候変動レベルを達成するための目的主導型のシナリオであり、政策目標として掲げる温室効果ガスの排出削減計画に合わせて選択できる。そのため、RCPシナリオ毎に同様のリスク評価がなされると、今後の気候変動対策の道筋を議論する上で必要かつ重要な情報となると考えられる。そこでは、本研究では扱わなかった短時間単位の気候値が出力できるRCMデータの活用がなされると、さらに具体的な対応策の検討に繋がる。

5.6 本章のまとめ

本章では、低平農地域の広域排水リスクに関わる様々な不確実性要素を整理すると共に、そのリスクが備える不確実性の確率的な評価手法を新たに提案した。得られた成果についてまとめると、以下のようである。

- 1) 低平農地域の広域排水リスクの評価では、気象水文要素の観測精度や時空間分布、評価モデルの構造や計算手法、さらに GCM による気候シナリオ毎の変化など多くの不確実性が絡み合っている。そのため、リスク評価の際にはそれらの不確実性を同時に評価し、併せて示す必要がある。
- 2) 5つの GCM から現在期間 15 個、将来期間は 3 つの RCP シナリオのそれぞれで 11 個の気候シナリオを収集した。そのシナリオ間にある不確実性に注目し、それぞれのシナリオから抽出した豪雨の発生頻度および豪雨量の平均と分散で品雄の特徴を定義した。それらの統計量の平均と分散を得て正規分布を当てはめ、気候シナリオ間に見る豪雨特性の不確実性を確率的に表現した。
- 3) 豪雨の模擬発生法の必要パラメータを 2) で得た正規分布に従って設定し、疑似の気候シナリオを多数生成させた。その下で発生した 1,000 個の豪雨グループのそれぞれから確率雨量を算定し、同確率年でまとめることでシナリオの不確実性を反映させた確率雨量の出現分布を得た。その結果、将来はどの RCP シナリオでも豪雨量の平均値が増すことが明らかになり、さらにその傾向は高位の RCP シナリオほど、また将来期間になるほど強く表れた。
- 4) 上記の確率雨量値を入力とした広域排水解析の出力から河川のピーク水位に注目し、雨量の確率年毎での危険水位の超過割合を洪水リスクとして評価した。その結果、対象とした柴山潟地点では現在の 10 年確率での洪水リスクが約 18%と評価され、さらに将来期間では最大で 2 倍程度に上昇する可能性が示された。
- 5) 水田被害リスクでは、一連の手法を通じて気候シナリオの不確実性を考慮した水稲被害量の出現分布を確率的に評価できた。その結果、最も気候変動が進行する RCP8.5 シナリオでは被害量の分布形状が現在から明らかに変化し、21 世紀末の平均被害量は現在期間の 30 年確率時の値に相当した。また、10 年確率時の被害量から得た被害金額分布の裾野に注目し、90%以上の部分の期待額を表す ES_{90} を時系列で比較すると、21 世紀末には最大で現在の 1.28 倍にまで上昇するなど、具体的な数字で将来のリスク変動を示すことができた。
- 6) 提案手法により、様々な不確実要因が及ぼす影響を反映させた広域排水リスクを評価できる。本研究のように気候変動の不確実性を対象にすると、農業農村整備事業や治水事業の計画に必要な水田被害リスクやその発生確率の将来変化を評価できる。その結果より、早急に対応すべき短期的な計画に加え、将来の気候変動の影響を見据えて中・長期的に達成すべき目標を掲げるなど、気候変動への対応策の開発にむけて有用な情報を得ることができる。

章末付録

Table 5.5 豪雨グループの模擬発生法に用いた各月の豪雨発生頻度の平均と分散

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Present	μ	0.10	0.02	0.04	0.21	0.53	0.66	0.41	0.61	0.23	0.19	0.15
	σ^2	0.004	0.000	0.001	0.001	0.008	0.010	0.028	0.031	0.018	0.006	0.012
Near F	μ	0.14	0.01	0.06	0.05	0.30	0.63	0.77	0.37	0.71	0.24	0.25
	σ^2	0.007	0.001	0.003	0.003	0.014	0.018	0.054	0.023	0.045	0.016	0.005
RCP2.6	μ	0.13	0.03	0.07	0.09	0.33	0.54	0.69	0.44	0.65	0.23	0.31
	σ^2	0.005	0.001	0.002	0.006	0.017	0.019	0.052	0.021	0.024	0.025	0.013
End21C	μ	0.16	0.01	0.07	0.08	0.35	0.62	0.80	0.46	0.62	0.26	0.31
	σ^2	0.007	0.000	0.004	0.003	0.006	0.066	0.060	0.018	0.029	0.019	0.022
Near F	μ	0.12	0.02	0.05	0.09	0.24	0.63	0.76	0.31	0.62	0.24	0.27
	σ^2	0.007	0.000	0.002	0.003	0.011	0.028	0.037	0.011	0.032	0.017	0.007
RCP4.5	μ	0.17	0.03	0.08	0.07	0.31	0.65	0.81	0.40	0.71	0.23	0.34
	σ^2	0.005	0.002	0.003	0.001	0.015	0.017	0.036	0.048	0.018	0.006	0.015
End21C	μ	0.19	0.04	0.10	0.12	0.33	0.70	0.81	0.42	0.72	0.30	0.35
	σ^2	0.014	0.002	0.003	0.003	0.020	0.016	0.078	0.009	0.017	0.016	0.021
Near F	μ	0.12	0.03	0.05	0.11	0.29	0.65	0.67	0.45	0.63	0.25	0.28
	σ^2	0.002	0.001	0.002	0.008	0.013	0.016	0.019	0.027	0.021	0.016	0.006
RCP8.5	μ	0.22	0.04	0.08	0.14	0.36	0.69	0.84	0.48	0.71	0.26	0.29
	σ^2	0.016	0.001	0.002	0.013	0.021	0.022	0.062	0.021	0.033	0.022	0.015
End21C	μ	0.27	0.08	0.11	0.19	0.50	0.78	0.75	0.45	0.76	0.31	0.34
	σ^2	0.011	0.003	0.007	0.017	0.023	0.026	0.094	0.010	0.034	0.021	0.012

Table 5.6 豪雨グループの模擬発生法に用いた豪雨量および変動係数の平均と分散

	Present	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5			
		Near F	Mid.21C	End21C	Near F	Mid.21C	End21C	Near F	Mid.21C	End21C	
m	μ	136.9	141.1	141.6	139.0	140.8	144.6	143.2	137.8	143.9	145.2
	σ^2	39.2	54.2	28.1	48.5	46.8	43.5	44.4	55.6	33.4	56.8
C.V.	μ	0.295	0.342	0.352	0.336	0.345	0.363	0.372	0.321	0.359	0.382
	σ^2	0.003	0.001	0.004	0.002	0.003	0.002	0.003	0.002	0.003	0.003

* NearF.:Near Future (2026~2050); Mid21C.: Middle of 21st century (2051~2075); End21C.: End of 21st century (2076~2100)

第6章

終章

6.1 結果のまとめ

第1章では、まず排水に制約がある低平農地域での豪雨災害発生現状と、それに対する気候変動の影響が予測されている事実を研究の背景として挙げ、対応策の必要性を示した。その対応策では、排水関連施設等のハード整備と共に、農地や農業水利施設が備える洪水緩和機能を活かした流域管理手法が有効になる可能性が考えられた。そこで本研究では、これらの対応策の開発のために必要となる低平農地域の広域排水リスクの評価手法を開発することを目的に位置づけ、関連する既往研究をレビューし残された課題を総括した。これらにより、本研究で目指す目標と、それによってもたらされる成果の意義を明確にした。

第2章では、まず研究の対象地区の地理情報と現状における気象・水文特性の特徴を明確にした。その上で、同地区の長期間の実測と気候モデル(GCM)予測値の降雨データを収集し、そこから分析の対象とする豪雨イベントの抽出方法を提案した。実測値より抽出した豪雨の発生頻度と雨量強度を豪雨特性として分析した結果、対象地区では過去から近年にかけて短時間雨量強度に変化傾向がみられ、6時間雨量では過去と比較して平均で8%程度も増加し、雨量が集中化している事実が明らかとなった。さらにGCM予測値では、複数の気候シナリオを分析した結果、将来は豪雨が頻発・強大化することが明示された。その傾向は、高位RCPシナリオであるほど、またデータ期間が将来になるほどより強く表れた。また収集気候シナリオの一部を時空間的に力学的ダウンスケールした結果を見ても、短時間雨量強度の上昇が見られ、将来における降雨パターンの集中化が予測された。これらにより、豪雨特性の変化傾向を定量的に評価することができ、研究対象とした低平農地排水に対する気候変動への対応策を計画・導入する必要性がより鮮明になった。しかし同時に、この豪雨特性の変化度合いが気候シナリオによって大きく異なることから、将来の気候予測に伴う不確実性が示された。

続く第3章では、2章で明らかにした実測豪雨のデータ群を対象とし、その長短時間特性を統計的に備える豪雨データの模擬発生法を開発した。ここで考慮したのは豪雨の月別発生頻度、日及び時間単位の雨量強度、雨量値の時間分布である降雨波形特性とし、それぞれの特性を実測データより明らかにした。模擬発生させて最終的に得られたデータ群を元データと比較すると、考慮したそれぞれの特徴を十分に再現できていることを証明できた。特に降雨波形については、自己相関性を備えると同時にピーク位置が前山～後山型まで広く分布する様々な波形パターンを発生できた。本手法は全国の

どの地域でも適用でき、これまでに経験したものから未経験のものまで多数の豪雨パターンを想定できることから、防災関連分野など豪雨波形の入力を必要とする様々な解析への応用が可能となった。

第4章では、低平水田域における農地—排水路を通じた豪雨時の排水過程をモデル化し、最終的なリスク評価のための解析モデルを構築した。同時に、このモデルから出力される水田湛水深から水深条件別の継続時間を抽出し、その結果へ水稻被害の評価指標を適用することで流域内の広域水田被害を容易かつ定量的に評価する一連の手法を提案した。その水稻被害の指標として、実水田内での模擬冠水試験を通じて様々な冠水条件と水稻減収率の関係をまとめた減収尺度を新たに策定し、活用した。本試験によって、これまで示されていなかった現行の水稻品種に対する冠水被害特性が明らかになった。またこの尺度より、水稻が冠水した場合でも葉先が水面から露出した状態であれば完全冠水と比較して4割～6割もの被害軽減となることが証明され、水稻被害評価時に詳細な冠水条件を考慮することの重要性が示された。

最後となる第5章では、前章までの成果を活用しながら、最終目的とした不確実性を考慮した広域排水リスクの評価法を開発した。ここでは、低平地域の排水に関する多数の不確実性要因の中から一例として気候シナリオ間に存在する不確実性に焦点を当て、その評価手法を詳述した。2章で収集した気候シナリオを活用し、それぞれの中から抽出された豪雨イベントの発生頻度と雨量強度の特性値で各シナリオの違いと不確実性を表した。その特性値の平均と分散から出現確率を確率分布（ここでは正規分布を採用）で定義する点が本手法の特徴である。この確率分布に従って得られる特性値の組み合わせで疑似の気候シナリオを多数生成し、その下で発生する豪雨グループを模擬発生させた。この多数の豪雨グループから得られる確率雨量の強度分布は、気候シナリオの不確実性を反映させた結果となる。この雨量分布に降雨パターンと発生月の情報を与えて広域排水リスク評価に用いた結果では、洪水リスク、水田被害リスク共にリスクの分布が得られ、不確実性が評価された。特に水田被害では、確率年毎に被害量やその損失金額を具体的に算定できる他、現在から将来にかけてリスク分布の形状を比較すると、気候変動によって影響を受けたリスクの変動度合いを時系列で評価することができた。提案した不確実性を確率的に定義し取り扱う手法は他の項目にも応用でき、様々な要因によるリスクへの影響を明らかにすることができる。

6.2 今後の研究展開

本論文では、低平水田域を対象とした広域排水リスクとその不確実性を評価することを目的とした一連手法を開発した。ここでは対象とする豪雨特性の変化傾向を明らかにし、その特性を備える豪雨データの模擬発生法と、低平水田域排水のモデル化と水田の被害評価指標を組み合わせたリスク評価手法を提案した。また、各気候シナリオから得た豪雨特性の不確実性を対象に、その出現確率を確率分布で定義することによって、最終目的であるリスクの不確実性を定量的に評価する手法を開発し、その結果を示した。

本研究で開発した一連の手法は、特に農業農村整備事業等の立案・更新計画を目的としたリスク評価を実施する際に有効である。例えば、将来の気候変動が水利施設や河川流況に及ぼすリスクの評価では、従来の決定論的な計画手法では想定できない平均的なものから最悪規模までの被害状況とその発生確率を予測でき、さらにそのリスクの時系列変化も評価できる。その情報を整備計画に取り込むことで、短期的計画として早急に求められる対策規模から、数十年程度のタイムスパンで整備すべき中・長期的な計画目標までを見据えることが可能となった。その長期計画の中では、豪雨に対応するためのハード整備を進める一方で、計画規模以上の極端豪雨が発生した場合には農地も含めた農業用水利施設が備える洪水緩和機能を積極的に活用するなど、ソフト対策の計画も視野に入る。その実現に向けた議論では、農業水利施設の利用を想定する場合のハード整備規模や費用便益、農地活用に対する補償費用等の評価が求められる。本研究の適用によってこれらの必要情報を提示でき、その結果等を活用した農業農村整備の長期計画手法が確立されると、ダム等の大規模構造物に頼らない気候変動対応策の具体的な提案にも繋がる可能性がある。また、これらの検討に際して新たな GCM の開発や気候シナリオの更新があった場合には、同様の手法を再度当てはめるなど柔軟に対応できる。

一方で、本研究を構成する個々の要素もそれぞれの活用場面が想定される。まず豪雨イベントの分析手法はどの地区においても適用可能であり、対象地区の長期間の豪雨特性を明らかにすることができる。観測データ期間が短い地域では GCM の気候シナリオからデータを得られる他、豪雨の模擬発生法を適用すると、地域特性を備えた降雨データを多数発生させることもできる。この模擬発生データは、豪雨波形を必要とする様々な場面での入力値として活用が期待され、例えば山間部の土砂災害から都市域の洪水氾濫解析、ため池等の貯水池における安全性評価までも含む防災・減災を目的とした種々の検討に活用できる。また広域排水リスクの評価に関連する水稻減収尺度は、逆の見方をすることで水田被害を一定以下に抑えられる許容可能な湛水条件を明らかにできる。これにより、その湛水条件を満たしながら最大限に農地活用を目指す農地の洪水緩和ポテンシャルを示すことができる。そこでは、筆者等がすでに開発に着手している農業水利用と洪水のシームレス解析モデル (Vongphet et al, 2015) ^[12] を評価モデルに据えると、洪水緩和に対する農業施設操作の効果や都市域への浸水被害リスク等も含めた総合的な評価が可能となる。このような知見を活用し、流域において農業サイドが果たせる役割が定量的に示されると、都市サイドとの連携の必要性やその効果がより明確になり、上記のような豪雨被害を最小限に抑えるための流域一体型の水管理手法の開発に繋がる。また、最後に示したリスクが持つ不確実性の評価手法は、気候変動への対応に加えて気象・水文観測値や解析モデルのパラメータのバラツキなど、関連する様々な不確実性要因に対して応用することができる。

以上をまとめると、本研究によってこれまで評価が困難であった低平水田域の広域排水リスクの不確実性を確率的に評価し、種々の治水・利水計画における確率論的な計画手法の必要性とその展開の可能性を示したことは意義があるといえる。

参考文献

- [1] 米穀安定供給確保支援機構 (2015) (参照 2015.11.25) : 平成 26 年度産水稻の品種別作付動向について, (オンライン), 入手先<<http://www.komenet.jp/pdf/H26sakutuke.pdf>>
- [2] Beven, K. and Kirkby, M. J.(1979) : A physically based variable contributing area model of basin hydrology, *Hydrological Sciences Bulletin*, **24**, 43-69.
- [3] Bratley, P., Fox, B.L. and Schrage, L.E. (1987) : *A Guide to Simulation*, Second Edition, Springer, 172-174.
- [4] 近森秀高, 永井明博 (1999) : 降雨波形が洪水到達如何に及ぼす影響, 水文・水資源学会誌, **12**(4), 319-326.
- [5] 近森秀高, 永井明博 (2002) : 岡山における日降雨特性の経年変化, 水文・水資源学会誌, **15**(5), 513-521.
- [6] 近森秀高, 永井明博 (2012) : Peak Over Threshold 理論による確率日雨量の推定, 農業農村工学会論文集, **278**, 89-97.
- [7] 近森秀高, 永井明博 (2013) 日本全国における日雨量の地域頻度解析, 農業農村工学会論文集, **287**, 55-67.
- [8] 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 (2015) (参照2016.11.20) : d4PDF, (オンライン) <<https://www.miroc-gcm.jp/pub/d4PDF>>
- [9] Coles, S (2001) : *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*, Springer, 74-91.
- [10] 江藤剛治, 室田 明, 米谷恒春, 木下武雄 (1986) : 大雨の頻度, 土木学会論文集, **369**, 165-174.
- [11] 藤原輝男, 久井 守 (1986) : 時間雨量時系列の模擬発生と土壌侵食量予測への適用, 農土論集, **122**, 67-74.
- [12] 藤原洋一, 高瀬恵次, 小倉 晃, 一恩英二, 長野峻介 (2015) : 雪温プロファイル計測による積雪深観測手法の実用的適用法に関する検討, 農業農村工学会論文集, **300**, 207-213.
- [13] 端野道夫 (1986) : 計画降雨波形の確率論的定式化と条件付確率降雨強度式の提案, 土木学会論文集, **369**, 139-146.
- [14] 端野道夫, 前 久司 (1990) : 多峰計画降雨波形の確率評価モデルの提案, 水工学論文集, **34**, 13-18.

- [15] 早瀬吉雄, 角屋 睦 (1976) : 不定流の数値計算法に関する考察—低平水田地帯の流出解析に関する研究 (I) —, 農業土木学会論文集, **65**, 48-57.
- [16] 早瀬吉雄, 角屋 睦 (1993a) : 低平地タンクモデルとその基礎的特性—低平地タンクモデルによる流出解析法 (I) —, 農業土木学会論文集, **165**, 75-84.
- [17] 早瀬吉雄, 角屋 睦 (1993b) : 低平地タンクモデルの適応性—低平地タンクモデルによる流出解析法 (II) —, 農業土木学会論文集, **165**, 85-91.
- [18] 早瀬吉雄, 角屋 睦 (1993c) : 複雑な排水組織をもつ広域水田地帯の流出解析—低平地タンクモデルによる流出解析法 (III) —, 農業土木学会論文集, **165**, 93-99.
- [19] 早瀬吉雄 (1994) : 水田地帯の洪水防止・軽減機能の評価と機能向上事業の提案, 農土誌, **62**(10), 1-6.
- [20] 早瀬吉雄 (2001) : 水田域と洪水緩和機能, 農林統計調査, **51**(3), 19-23.
- [21] Hershenhorn, J. and Woolhiser, D.A. (1987) : Disaggregation of daily rainfall, *Journal of Hydrology*, **95**, 299-322.
- [22] 平川秀幸 (2002) : リスクの政治学—遺伝子組み換え作物論争のフレーミング分析, 公共のための科学技術, 小林傳司編, 玉川大学出版部, 109-138
- [23] 北國新聞朝刊 2006.7.18.
- [24] 星 清 (1998) : 洪水ピークの確率評価法について, 開発土木研究所月報, **539**, 34-40.
- [25] 茨城県農業総合センター (2010) (参照 2015.11.5) : 普通作物栽培基準 (含む, 工芸作物), (オンライン), 入手先<http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_sehi_kizyun/pdf/101122sakumotu.pdf>
- [26] 池田三郎, 盛岡 通 (1993) : リスクの学際的定義, 日本リスク研究学会誌, **5**(1), 14-17.
- [27] Ines, A. V. M. and Hansen J. W. (2006) : Bias correction of daily GCM rainfall for crop simulation studies, *Agricultural and Forest Meteorology*, **138**, 44-53.
- [28] 石川県土木部河川課 (2007) : 新堀川水系河川整備計画.
- [29] Johnson, M.E. (1987) : *Multivariate statistical simulation*, Wiley, 38.
- [30] 角屋 睦, 福島 晟, 丈達俊夫 (1970) : 日雨量系列の模擬発生と内水排除計画への適用, 京大防災研究所年報, **13**(B), 135-145.
- [31] 角屋 睦, 早瀬吉雄 (1979) : 巨椋低平流域の都市化と内水, 京都大学防災研年報, **22**, B-2, 237-256.
- [32] 角屋 睦 (1980) : 流出解析手法 (その 6) —3. 雨水流法-表面流出モデルによる洪水流出解析—, 農業土木学会誌, **48**(6), 419-425.
- [33] 角屋 睦, 早瀬吉雄 (1981) : 流出解析手法 (その 14) —低平地タンクモデルによる洪水解析—, 農業土木学会論文集, **49**(4), 321-332.
- [34] 角屋 睦 (1985) : 都市化に伴う流出の変化, 土木学会論文集, **363**, II-4, 23-34.

- [35] 角屋 睦, 増本隆夫, 田中丸治哉 (1993) : 複峰型豪雨波形の一表現法, 農土論集, **164**, 115-123.
- [36] 狩野幹夫, 祝迫親志, 小林 誠, 塩幡昭光 (1982) : 冠水による水稻の病害と収量並びに品質に及ぼす影響, 関東東山病害虫研究会年報, **29**, 31-32.
- [37] 環境省 (2015) (参照 2016.8.23) : 気候変動の影響への適用計画 (オンライン), 入手先<<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/tekiou/siryo1.pdf>>
- [38] Kay, L., H. N. Davies, V. A. Bell, R. G. Jones (2009) : Comparison of uncertainty sources for climate change impacts: flood frequency in England, *Climate Change*, **92**, 41-63.
- [39] Kayastha, Nagendra (2014) : *Refining the Committee Approach and Uncertainty Prediction of Hydrological Modeling*, Taylor & Francis Group.
- [40] 気象庁 (2013) (参照 2015.4.22) : 地球温暖化予測情報第 8 巻, (オンライン), 入手先<<http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/GWP/Vol8/pdf/all.pdf>>
- [41] 気象庁 (2014) (参照 2015.10.21) : 気候変動監視レポート 2013, (オンライン), 入手先<http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/2013/pdf/ccmr2013_all.pdf>
- [42] 気象庁 (2015) (参照 2015.11.11) : 気候変動監視レポート 2014, (オンライン), 入手先<http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/2014/pdf/ccmr2014_all.pdf>
- [43] 北野利一, 高橋倫也, 田中茂信 (2011) : 確率降雨量の統計解析の蹴るモデル適合性の限界, 土木学会論文集, **67**(4), 277-282.
- [44] 小林健一郎, 寶 馨 (2009) : 洪水氾濫シミュレーションによる農地の作物被害の推定, 京都大学防災研究所年報, **52B**, 19-27
- [45] 小林健一郎, 寶 馨 (2010) : 洪水による被害推定手法の高度化に関する研究, 京都大学防災研究所年報, **53B**, 7-14.
- [46] 小林正男, 小高真一, 石丸良博 (1978) : 北海道における水稻乳熟期冠水害の減収推定尺度—昭和 50 年 8 月台風 6 号による水害の実態から—, 北農, **509**, 1-6.
- [47] 国土交通省河川局 (2005) : 治水経済調査マニュアル.
- [48] 国土交通省北陸地方整備局 (2015) : 梯川水系河川整備計画 [国管理区間] (案) .
- [49] Kotera, A., Nawata, E., Thao, L.V., Vuong, N.V. and Sakuratani, T. (2005) : Effect of Submergence on Rice Yield in the Red River Delta, Vietnam, *Japanese Journal of Tropical Agriculture*, **49**(3), 197-206.
- [50] 小槻峻司, 田中賢治, 小尻利治 (2013a) : 気候変動が日本の水資源に与える影響推計 (I) —日本全域水資源モデルの開発—, 水文・水資源学会誌, **26**(3), 133-142.
- [51] 小槻峻司, 田中賢治, 小尻利治 (2013b) : 気候変動が日本の水資源に与える影響推計 (II) —水需給・米生産変化と適応策—, 水文・水資源学会誌, **26**(3), 143-152.
- [52] 工藤 亮治, 永井 明博, 近森秀高 (2010) : 地域確率雨量の経年変化, 農業農村工学会論文集, **266**, 63-69.

- [53] 工藤亮治, 増本隆夫, 吉田武郎, 堀川直紀 (2012) : 気候変動が灌漑主体流域における農業水利用に与える影響の定量的評価法, 農業農村工学会論文集, **277**, 31-42.
- [54] 工藤亮治, 増本隆夫, 堀川直紀, 吉田武郎, 皆川裕樹, 名和規夫 (2014) : 日降水特性および水循環解析からみた GCM 降水量のバイアス補正法の評価, 応用水文, **26**, 1-10.
- [55] 工藤亮治, 皆川裕樹, 名和規夫, 増本隆夫 (2015) : 領域気象モデルWRFを用いた力学的ダウンスケーリングによる豪雨の気候学的再現性, 応用水文, **27**, 19-28.
- [56] 工藤亮治, 吉田武郎, 堀川直紀, 増本隆夫, 名和規夫 (2016) : 気候変動が広域水田灌漑に及ぼす影響の全国マップとその不確実性, 応用水文, **28**, 11-20.
- [57] 馬奈木俊介 (2013) : 災害の経済学, 中央経済社, 48-49.
- [58] 増本隆夫, 田村弘幸, 佐藤 寛 (1992) : 河北潟周辺における広域排水モデルの構築と排水機能評価, 北陸農業試験場報告, **34**, 43-65.
- [59] 増本隆夫 (1993) : 豪雨の波形特性と最大雨量の分布, 農業土木学会論文集, **164**, 105-113.
- [60] 増本隆夫, 佐藤 寛, 渋谷勤治郎 (1993) : Kriging 理論による雨量計の最適配置法に関する研究, 農業土木学会論文集, **165**, 111-119.
- [61] 増本隆夫 (1998) : 水田の貯留機能評価と水資源の流域管理にみるパラダイム・シフト, 水文・水資源学会誌, **11**(7), 711-722.
- [62] Masumoto, T., Yoshida, T. and Kubota, T. (2006) : An index for evaluating the flood-prevention function of paddies, *Paddy and Water Environment*, **4**, 205-210, doi:10.1007/s10333-006-0050-x.
- [63] 増本隆夫, 酒井博之, 吉田武郎, 堀川直紀 (2009) : 大氾濫時における水田排水施設が果たした災害低減効果の評価, 応用水文, **21**, 38-47.
- [64] 増本隆夫 (2010) : 広域水田地帯の洪水防止機能の評価と将来の流域水管理への利活用 (I), 水利科学, **315**, 23-38.
- [65] 松原純子 (1989) : リスク科学入門, 東京図書
- [66] McNeil, A. J., Frey, R., Embrechts, P. (2005) : *Quantitative Risk Management: Concepts, Tschniques and Tools*, Princeton University Press, (塚原英敦, 小林 俊, 三浦良造, 川崎能典, 山内浩嗣, 中山秀敏訳 (2008) : 定量的リスク管理—基礎概念と数理技法—, 共立出版, 44-56.)
- [67] 道広有理, 佐藤嘉展, 鈴木 靖 (2011) : CMIP3 マルチ気候モデルにおける日本陸域を対象とした地上気象要素の再現性・不確実性評価, 水文・水資源学会誌, **24**(5), 280-291.
- [68] 皆川裕樹, 増本隆夫 (2010) : 実降雨データと温暖化実験データにみる金沢周辺の豪雨の強度変化と発生分布, 応用水文, **22**, 1-10.
- [69] Minakawa, H. and Masumoto, T. (2013) : Variability in Intensity of Heavy Rainfall due to Climate Change and its Impact on Paddy Inundation in Low-lying Areas of Japan, *Irrigation and Drainage*, **62**(5), 679-686., doi:10.1002/ird.1762.
- [70] 皆川裕樹, 増本隆夫, 堀川直紀, 吉田武郎, 工藤亮治, 北川 巖, 瑞慶村知佳 (2013) : 水稻

- 減収尺度の策定のための実水田圃場内に清水・濁水区を設けた模擬冠水試験—試験手法の提案と生育概況調査—, 農工研技報, **214**, 111-121.
- [71] 皆川裕樹, 増本隆夫, 名和規夫, 吉田武郎, 工藤亮治, 北川 巖 (2014) : 水田冠水に伴う水稲被害量を推定するための模擬冠水試験法, 水と土, **172**, 52-58.
- [72] 宮津 進, 吉川夏樹, 阿部 聡, 三沢眞一, 安田浩保 (2012) : 田んぼダムによる内水氾濫被害軽減効果の評価モデルの開発と適用, 農業農村工学会論文集, **282**, 15-24.
- [73] 水沢誠一, 阿部徳文, 仲山和久, 萩野孝司, 東 聡志, 金高正典, 奈良悦子 (2006) : 7.13 新潟豪雨による冠水および土砂流入が水稲の生育・収量に及ぼした影響, 北陸作物学会報, **41**, 149-151.
- [74] Moss, R. H., Jae A. Edmonds, Kathy A. Hibbard, Martin R. Manning, Steven K. Rose, Detlef P. van Vuuren, Timothy R. Carter, Seita Emori, Mikiko Kainuma, Tom Kram, Gerald A. Meehl, John F. B. Mitchell, Nebojsa Nakicenovic, Keywan Riahi, Steven J. Smith, Ronald J. Stouffer, Allison M. Thomson, John P. Weyant and Thomas J. Wilbanks Moss (2010) : The next generation of scenarios for climate change research and assessment, *Nature*, **463**, 747-756.
- [75] 永井明博, 角屋 睦 (1980) : タンクモデルの最適同定法に関する基礎的検討, 京大防災研究所年報, **23**, B-2, 239-247.
- [76] 長戸一雄, 江幡守衛 (1965) : 登熟期の高温が穎果の発育ならびに米質に及ぼす影響, 日作紀, **34(1)**, 59-66.
- [77] 中島暢太郎, 後町幸雄, 荻本 洋 (1969) : 豪雨の研究 (I), 京都大学防災研究所年報, **12(B)**, 185-199.
- [78] 日本リスク研究学会 (2006) : 増補改訂版リスク学辞典, 阪急コミュニケーションズ, 13.
- [79] 日本リスク研究学会 (2008) : リスク学用語小辞典, 丸善株式会社, 273-274.
- [80] 野原大督, 坪井亜美, 堀 智晴 (2009) : 長期貯水池操へのアンサンブル降水予報導入時における最適化モデルの放流量決定過程に関する一考察, 京都大学防災研究所年報, **52B**, 753-764.
- [81] 能登史和, 丸山利輔, 早瀬吉雄, 瀧本裕士, 中村公人 (2010) : 手取川流域におけるタンクモデルを用いた積雪水資源量の評価, 農業農村工学会論文集, **268**, 31-37.
- [82] 能登史和, 丸山利輔, 早瀬吉雄, 瀧本裕士, 中村公人 (2011) : 手取川流域における積雪水資源量の長期間分析と地球温暖化による影響予測, 農業農村工学会論文集, **274**, 1-7.
- [83] 農業農村工学会 (2010) : 改訂七版農業農村工学ハンドブック本編, 農業農村工学会, 196.
- [84] 農林水産省大臣官房統計部 (2014) (参照 2015.10.21) : 平成 26 年耕地面積 (7 月 15 日現在), (オンライン), 入手先<http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/menseki/pdf/menseki_kou ti_14-1.pdf>
- [85] 農林水産省大臣官房統計部 (2016) (参照 2016.7.1) : 全国農業地域別・都道府県別累年統計表 (平成 22 年産~26 年産) (2016 年 1 月 19 日公表), (オンライン), 入手先<<http://www.e->

- stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001129556>
- [86] 農林水産省北陸農政局石川農地防災事業所 (2007) : 加賀三湖周辺一農地防災事業事業誌一
- [87] 農林水産省農村振興局 (2006) : 土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 計画「排水」, 186-199.
- [88] 農林水産省政策統括官付農産企画課 (2016) (参照 2016.4.8) : 平成 27 年産米の相対取引価格・数量 (平成 28 年 1 月) (速報), (オンライン), 入手先<<http://www.maff.go.jp/j/seisan/keikaku/soukatu/aitaikakaku.html>>
- [89] 農林省宮城統計調査事務所 (1951) : 昭和 23 年水害に依る水稻被害減収推定尺度の種々相, 3-12.
- [90] 農林省農林経済局統計調査部 (1957) : 水稻減収推定尺度, 農業技術協会, 12-13.
- [91] 農林省統計調査局 (1948) : 水稻風水害及び旱害減収推定尺度, 農作物被害調査資料 5.
- [92] 岡 正, 窪田 忍 (1961) : 水稻の冠水対策に関する試験, 第 1 報幼穂伸長期における冠水被害について, 日本作物学会九州支部会報, **16**, 52-54.
- [93] 大賀康之, 松尾 太, 古賀金次郎 (1991) : 水稻早期栽培コシヒカリの穂ばらみ期における浸冠水が収量及び収量構成要素に及ぼす影響, 福岡県農業総合試験場研究報告 A 作物, **11**, 23-26.
- [94] 大西亮一, 丹治 肇, 柚山義人 (1988) : 機械排水地区における内水対策 一伊曾島南部地区の常時排水量と排水診断一, 農業土木試験場技報, **9**, 1-83.
- [95] Ripley, B.D. (1987) : *Stochastic simulation*, Wiley, 55.
- [96] リスク学事典編集委員会 (1993) : リスク分析の考え方とその方法一特集 : リスク学のアプローチのまとめ一, 日本リスク研究学会誌, **5**(1), 1-7.
- [97] 坂上潤一, 曾根千晴, 中園幹生 (2012) : イネの洪水被害と冠水抵抗性, 日作紀, **81**(1), 1-9.
- [98] 寒川典昭, 鈴木將史 (2008) : 日本列島20世紀の降水量時系列の経年的非定常性とその確率降水量の評価値に及ぼす影響, 自然災害科学, **26**(4), 355-365.
- [99] 佐山敬洋, 立川康人, 寶 馨 (2005) : 流出モデルの不確実性評価手法とそのモデル選択への適用, 土木学会論文集, **789** II-71, 1-13.
- [100] 佐山敬洋, 立川康人, 寶 馨, 増田亜美加, 鈴木琢也 (2008) : 地球温暖化が淀川流域の洪水と貯水池操作に及ぼす影響の評価, 水文・水資源学会誌, **21**(4), 296-313.
- [101] Sayama, T, Ozawa, G, Kawakami, T, Nabesaka, S, Fukami, K (2012) : Rainfall-runoff-inundation analysis of the 2010 Pakistan flood in the Kabul River basin, *HYDROLOGICAL SCIENCES JOURNAL*, **57**(2), 298-312, DOI: 10.1080/02626667.2011.644245.
- [102] 渋尾欣弘, 生駒栄司, Oliver C. SAAVEDRA V., Lei WANG, Petra KOUDELOVA, 喜連川 優, 小池俊雄 (2014) : リアルタイムアンサンブル洪水予測実用化システムの開発, 水工学論文集, **58**, 397-402.

- [103] 志村博康 (1982) : 水田・畑の治水機能評価, 農土誌, **50**(1), 25-29.
- [104] 進藤勇人, 齋藤雅憲, 佐藤雄幸 (2012) : 直播水稻分げつ期における冠水が生育に及ぼす影響, 東北農業研究, **65**, 47-48.
- [105] 菅原正巳 (1972) : 水文学講座 7 流出解析法, 共立出版
- [106] 立川康人, 日和佐真丈, 寶 馨 (2003) : ランダムカスケードモデルと降雨標高依存直線を用いた降雨空間分布の模擬発生, 水工学論文集, **47**, 127-132.
- [107] 寶 馨, 小林健一郎 (2009) : 標本サイズと水文頻度解析, 水工学論文集, **53**, pp.205-210.
- [108] 高瀬恵次, 小倉 晃, 藤原洋一, 丸山利輔 (2016) : 積雪深の再現を目的としたモデルの構築と検証, 水文・水資源学会誌, **29**(2), 107-115
- [109] 田中智大, 立川康人, 萬 和明 (2015) : 降雨の時空間分布を考慮した深水・氾濫に対する水害リスクカーブの作成, 土木学会論文集 B1 (水工学), **71**(4), 1483-1488.
- [110] 田中智大, 立川康人, 市川 温, 萬 和明 (2016) : 浸水被害額を支配する水利量の分析と水害リスクカーブの作成への応用, 土木学会論文集 B1 (水工学), **72**(1), 26-37.
- [111] 田中雄作 (1972) : 治水計画における降雨波形の処理について, 土木学会論文報告集, **204**, 39-49.
- [112] 田中丸治哉 (1993) : 遺伝的アルゴリズムによるタンクモデル定数の同定, 京大防災研究所年報, **36**, B-2, 231-239.
- [113] 谷口智之, 増本隆夫, 清水克之, 堀川直紀, 吉田武郎 (2009a) : 多様な水田水利用を考慮した分布型水循環モデルの開発 (1) : 作付時期・作付面積推定モデル, 水文・水資源学会誌, **22**(2), 101-113.
- [114] 谷口智之, 増本隆夫, 堀川直紀, 清水克之, 吉田武郎 (2009b) : 多様な水田水利用を考慮した分布型水循環モデルの開発 (2) : 水利用分類と水管理に基づく必要水量の推定, 水文・水資源学会誌, **22**(2), 114-125.
- [115] 谷口智之, 増本隆夫, 吉田武郎, 堀川直紀, 清水克之 (2009c) : 多様な水田水利用を考慮した分布型水循環モデルの開発 (3) : モデル構成と農地水循環量の推定, 水文・水資源学会誌, **22**(2), 126-140.
- [116] 丹治 肇, 大西亮一, 豊田裕道 (1986) : 西津軽地区の排水システム解析, 農業土木試験場技報, **7**, 85-111.
- [117] Taylor, K. E., Stouffer, R. J., Meehl, G.A. (2012) : An overview of CMIP5 and the experiment design, *Bulletin of the American Meteorological Society*, **93**(4), 485-498.
- [118] 豊田 勝 (1977) : 機械排水流域における流出解析の一方法, 農業農村工学会論文集, **69**, 35-41.

- [119] Tuboki, K., Yoshioka, M., Shinoda, T., Kato, M., Kanada, S., Kitoh, A. (2015): Future increase of supertyphoon intensity associated with climate change, *Geophysical Research Letters*, **42**, 646-652, doi: 10.1002/2014GL061793.
- [120] 氏家四郎, 斎藤豊治, 加藤 力 (1956) : 水田冠水被害による形態的变化について, *農業気象*, **12**(3), 91-94.
- [121] Vongphet, J., Masumoto, T., Minakawa, H. (2015) : Development of a seamless model to simultaneously simulate agricultural water use and the effects of flooding, *Applied Hydrology*, **27**, 29-37.
- [122] Vose, D. (2000) : *Risk Analysis : A Quantitative Guide*, Jhon Wiley & Sons (長谷川 博, 堤 盛人 訳 (2003) : 入門リスク分析, 勁草書房, 28-42.)
- [123] 和田一範, 川崎将生, 富澤洋介 (2006) : 地域気候モデルを用いた地球温暖化に伴う洪水リスクの評価に関する考察, *水工学論文集*, **50**, 613-618.
- [124] WANG Chao-Wen, 吉見和敏, 辛島史嗣, 山田 正 (2015) : 降雨の不確実性に基づく確率過程論を導入した堤防の信頼度評価, *土木学会論文集G (環境)*, **71**(5), 1-6.
- [125] Woolhiser, D.A. and Osborn, H.B. (1985) : A Stochastic Model of Dimensionless Thunderstorm Rainfall, *Water Resources Research*, **21**(4), 511-522.
- [126] Wynne, B. (2001) : Managing scientific uncertainty in public policy, Background paper to the conference, *Biotechnology and global Governance: Crisis and Opportunity*, April 26-28, 2001, Harvard University Wetherhead Center for International Affairs. Cambridge, MA. USA.
- [127] 山田 登, 太田保夫 (1956) : 水稻の冠水抵抗性に関する品種間差異, *日作紀*, **24**, 151-153.
- [128] 四方田 穆, 丸山利輔, 手島三二 (1976) : 水田落水口からの流出に関する統計的考察—水田地帯の流出解析 (II) —, *農土論集*, **66**, 21-27.
- [129] 吉田武郎, 増本隆夫, 堀川直紀 (2012a) : 農村工学研究所内における総合気象観測システムの構築とそのデータ品質管理, *農村工学研究所技報*, **212**, 43-52.
- [130] 吉田武郎, 増本隆夫, 工藤亮治, 谷口智之, 堀川直紀 (2012b) : 広域水田灌漑地区の用水配分・管理モデルの実装による流域水循環のモデル化, *農業農村工学会論文集*, **277**, 9-19.
- [131] 吉川夏樹, 長尾直樹, 三沢真一 (2009) : 田んぼダム実施流域における洪水緩和機能の評価, *農業農村工学会論文集*, **261**, 41-48.
- [132] 吉見和敏, 山田 正, 山田朋人 (2015) : 確率微分方程式の導入による降雨流出過程における降雨の不確実性の評価, *土木学会論文集 B1 (水工学)*, **71**(4), 259-264.
- [133] 四辻哲章 (2010) : 計算機シミュレーションのための確率分布乱数生成法, プレアデス出版, 53-65.
- [134] 柚山義人, 大西亮一, 丹治 肇 (1988) : 亀田郷の広域排水解析, *農業土木試験場技報*, **9**, 85-161.

謝 辞

本論文を纏めるあたり、本当に多くの方々にお世話になった。

農研機構農村工学研究部門の増本隆夫博士には、本研究の端緒から懇切丁寧なご指導と多くのご助言を頂いた。同時に、私が同部門に入所して今日に至るまで、継続して研究者としての心構えから論文執筆の細やかな作法まで御教授を賜った。また筑波大学生命環境科学研究科の石井 敦教授、同宮本邦明教授、同佐藤政良名誉教授には、本論文の取り纏めに際して貴重な御指摘と御助言を賜った。

本研究の遂行にあたって、農研機構農村工学研究部門の北川 巖博士には、水稻栽培の基礎から冠水試験手法まで多くの御指導と御協力を頂いた。また岡山大学大学院環境生命科学研究科の工藤亮治准教授からは、水文データの取り扱いやプログラミング技術について多くの御助言を頂いた。名和規夫博士、石田 聡博士、堀川直紀氏、久保田富次郎氏、白旗克志氏、土原健雄博士、吉田武郎博士、吉本周平博士、宮津 進博士からは、同じ研究室で過ごす中で多くの御助言と御協力、温かい励ましを頂いた。また、これまで9年間継続してきた農工研「気候変動」定例研究会の参加メンバーの皆様からは、議論を通じて貴重な御指摘と御助言を頂いた。上記のメンバーに加えて同部門に所属する特に同年代の諸先輩方からは、研究に取り組む姿勢を学ぶと共に、多くの刺激を頂いた。

丸山利輔京都大学名誉教授、石川県立大学生物資源環境学部環境科学科（当時）の早瀬吉雄教授を始め、本研究を始めるきっかけとなった農林水産省委託研究「農業用水を核とした健全な水循環に関する研究（平成19年-24年）」プロジェクトに関わられた方々からは多くの御協力と御助言をいただいた。さらに同プロジェクトを通じて、加賀三湖土地改良区、石川県の南加賀農林総合事務所および南加賀土木総合事務所、国土交通省北陸地方整備局金沢河川国道事務所には、研究の遂行に必要な貴重な資料を快く提供して頂いた。

また富澤はる子氏、岩下みどり氏、熊谷奈津子氏、吉田智美氏には、データ整理から出張や業務発注などの事務手続きに至るまで多大な御協力を頂くと共に、多くの励ましを賜った。

最後に、これまで十分な教育の機会を与えて頂き、私の度重なる我が儘にもあえて口を挟まず温かく成長を見守ってくれた両親には感謝の念に堪えない。

本研究は、ここに記した方々を含む多くの諸氏からの援助の賜である。このような恵まれた環境で研究に従事できたことは誠に幸せと感じている。ここに記して、深謝の意を表す。