

博士論文 2020年度（令和2年度）

南アジア・東南アジアの気象水文量の
長期変化と水災害リスクに関する研究

*Study on Long Term Variation of Hydro-Meteorology Data and
Water-Related Disaster Risk in South Asia and South-East Asia*

2021年3月

村岡 和満

山口大学大学院 理工学研究科

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 既往研究	4
1.3 研究の目的	5
1.4 本論文の構成	5
参考文献	7
第2章 メコン川中下流域における長期水文データの変化傾向	9
2.1 メコン川流域の背景	9
2.2 メコン川の概要	10
2.3 流況の分析	10
2.4 降水量・流量の時系列変化傾向の分析	12
2.4.1 年間降水量の変化傾向	12
2.4.2 メコン川本川および支川の流量変化傾向	13
2.4.3 洪水時および渇水時の流量変化傾向	15
2.4.4 しきい値超過回数分析	16
2.4.5 年最大流量と渇水流量の極値解析	17
2.5 本章のまとめ	19
参考文献	20
第3章 ガンジス川下流域における長期水文データの変化傾向	21
3.1 はじめに	21
3.2 既往研究	21
3.3 ベンガル地域の気象水文データと洪水の状況	22
3.3.1 気象水文データ	22
3.3.2 バングラデシュの降水量	23
3.3.3 バングラデシュの洪水	24
3.4 解析手法	27
3.4.1 データの前処理	27
3.4.2 長期変化傾向の分析	27
3.5 解析結果と考察	29
3.5.1 トレンド解析の進め方	29

3.5.2	ベンガル地域の降水量変化傾向	30
3.5.3	極端現象のトレンド	34
3.6	本章のまとめ	39
	参考文献	40
第4章	ベンガル地域の長期気象水文学と地球規模現象との相関・因果関係の解明	43
4.1	はじめに	43
4.2	既往研究	43
4.3	解析手法	44
4.3.1	Wavelet 解析	44
4.3.2	因果関係の分析	45
4.4	解析結果と考察	47
4.4.1	降水パターン変化と気候変動指数の相関関係	47
4.4.2	時系列データ同士の因果推論	51
4.5	本章のまとめ	54
	参考文献	55
第5章	RRIを用いたバングラデシュ三大河川の流出氾濫再現計算と洪水の要因分析	57
5.1	はじめに	57
5.2	バングラデシュの水災害	60
5.2.1	三大河川流域と洪水の特徴	60
5.2.2	過去の大洪水	62
5.2.3	流域の降水量	63
5.2.4	河川水位流量と氾濫の形態	65
5.3	RRIモデルによる流出氾濫解析	68
5.3.1	RRIモデルの適用	68
5.3.2	RRIモデルの構築	69
5.3.3	解析結果と考察	73
5.3.4	モデルの改善	83
5.4	水災害の要因と将来予測	84
5.4.1	降水量の地域特性と流出への影響	84
5.4.2	降水量の長期変化傾向を反映した流出量の将来予測	84
5.5	おわりに	87

参考文献	88
第 6 章 結論	93
6.1 本研究のまとめ	93
6.2 今後の展望	94
謝辞	96
付 録 A 計算結果	99
A.1 観測流量と計算流量の比較	99
A.1.1 Burahmaputra 川流域代表地点における流量実測値と計算値の比較	99
A.1.2 Ganges 川流域代表地点における流量実測値と計算値の比較	102
A.1.3 Meghna 川流域代表地点における流量実測値と計算値の比較	103
A.1.4 Haor 代表地点における流量実測値と計算値の比較	105
A.2 観測水位と計算水位の比較	106
A.2.1 Burahmaputra 川流域代表地点における水位実測値と計算値の比較	106
A.2.2 Ganges 川流域代表地点における水位実測値と計算値の比較	109
A.2.3 Meghna 川流域代表地点における水位実測値と計算値の比較	110
A.2.4 Haor 代表地点における水位実測値と計算値の比較	113

目 次

1.1	洪水に対する脆弱性評価	1
1.2	メコン川流域図	3
1.3	ガンジス川・ブラマプトラ川・メグナ川流域図	3
2.1	メコン川流域図と主要観測地点 ^[35]	11
2.2	メコン川主要観測地点の比流量 ^{[33][35]}	12
2.3	年間降水量の経年変化傾向 ^[38]	13
2.4	メコン川本川, 支川の年平均流量変化傾向	15
2.5	メコン川本川, 支川の渇水流量変化傾向	15
2.6	ビエンチャン地点の年最大流量変化傾向	16
2.7	ビエンチャン地点の渇水流量変化傾向	16
2.8	年最大流量の極値分析 (ビエンチャン地点)	18
2.9	渇水流量の極値分析 (ビエンチャン地点)	18
3.1	ベンガル地域の平均年降水量と標高地形図	23
3.2	Cherrapunjee の月降水量 (1901~2015)	23
3.3	年毎の氾濫面積率 (1950 ~ 2017)	24
3.4	GBM 代表水位観測所とハオール (Haor) の位置	25
3.5	1988, 1998, 2007, 2017 年における GBM 代表観測所の水位変化	26
3.6	ダッカの月降水量の STL 分解	28
3.7	有意なトレンドを有する地点と Sen's Slope の分布 (※凡例の大小は Sen's Slope の大きさを表している)	31
3.8	インド東北部 7 地域位置図	32
3.9	期毎に区切った場合の Sen's Slope の比較	35
3.10	閾値と超過回数変化の傾きとの関係	36
3.11	GBM と Haor 代表水位観測所の位置	37
3.12	SW46.9L Bahadurabad Transit の毎年水位変化	38
4.1	Wavelet による SOI, DMI と月降水量の解析結果	48
4.2	Cherrapunjee の SPI の変化	49
4.3	Cross-Wavelet による SOI, DMI と SPI の解析結果 (DMI と SOI の比較)	51
4.4	SOI と DMI の因果関係	52

4.5	位置図	53
4.6	SOI, DMI と Sylhet の降水量との因果関係	53
5.1	三大河川流域図	59
5.2	三大河川流域の標高	60
5.3	洪水の特徴	61
5.4	年毎の氾濫面積率 (1950 ~ 2017)	62
5.5	地上観測データと衛星観測データ GSMaP の比較	64
5.6	GBM 代表水位・流量観測所	65
5.7	GSMaP の年間降水量積算値	66
5.8	2004, 2007, 2016, 2017 年における GBM 代表観測所の水位変化	67
5.9	RRI モデルの概要	69
5.10	三大河川の RRI モデル	71
5.11	ガンジス川 SW90 地点の流量実測値と計算値の比較	74
5.12	ガンジス川 SW90 地点の水位実測値と計算値の比較	74
5.13	ブラマプトラ川 SW46.9L 地点の流量実測値と計算値の比較	76
5.14	ブラマプトラ川 SW46.9L 地点の水位実測値と計算値の比較	76
5.15	メグナ川 SW273 地点の流量実測値と計算値の比較	78
5.16	メグナ川 SW273 地点の水位実測値と計算値の比較	78
5.17	Haor (ハオール) SW269 地点の流量実測値と計算値の比較	79
5.18	Haor (ハオール) SW269 地点の水位実測値と計算値の比較	79
5.19	2007 年 8 月 3 日の衛星画像に基づく浸水区域と RRI 再現計算による浸水区域	81
5.20	2017 年 9 月 6 日の衛星画像に基づく浸水区域と RRI 再現計算による浸水区域	81
5.21	2016 年 8 月 30 日の衛星画像に基づく浸水区域と RRI 再現計算による浸水区域	82
5.22	2017 年 4 月 8 日の衛星画像に基づく浸水区域と RRI 再現計算による浸水区域	82
5.23	G001 モデルの 2007 年の計算結果 (最大浸水区域)	85
5.24	B001 モデルの 2007 年の計算結果 (洪水ピーク時流量)	85
5.25	100 年後のメグナ川流域浸水深の変化	86
5.26	100 年後のブラマプトラ川 SW46.9L 地点の流量変化	87
A.1	Burahmaputra 川 SW46.9L 地点の流量実測値と計算値の比較	99
A.2	Teesta 川 SW294 地点の流量実測値と計算値の比較	100
A.3	Dharla 川 SW77 地点の流量実測値と計算値の比較	100

A.4	Dudhkumar 川 SW81 地点の流量実測値と計算値の比較	101
A.5	Ganges 川 SW90 地点の流量実測値と計算値の比較	102
A.6	Meghna 川 SW273 地点の流量実測値と計算値の比較	103
A.7	Kushiyara 川 SW175.5 地点の流量実測値と計算値の比較	103
A.8	Surma 川 SW267 地点の流量実測値と計算値の比較	104
A.9	Old Burahmaputra 川 SW228.5 地点の流量実測値と計算値の比較	104
A.10	Haor (ハオール) SW269 地点の流量実測値と計算値の比較	105
A.11	Burahmaputra 川 SW46.9L 地点の水位実測値と計算値の比較	106
A.12	Burahmaputra 川 SW49 地点の水位実測値と計算値の比較	106
A.13	Teesta 川 SW294 地点の水位実測値と計算値の比較	107
A.14	Dharla 川 SW77 地点の水位実測値と計算値の比較	107
A.15	Dudhkumar 川 SW81 地点の水位実測値と計算値の比較	108
A.16	Ganges 川 SW90 地点の水位実測値と計算値の比較	109
A.17	Ganges 川 SW88 地点の水位実測値と計算値の比較	109
A.18	Meghna 川 SW273 地点の水位実測値と計算値の比較	110
A.19	Kushiyara 川 SW175.5 地点の水位実測値と計算値の比較	110
A.20	Surma 川 SW267 地点の水位実測値と計算値の比較	111
A.21	Old Burahmaputra 川 SW228.5 地点の水位実測値と計算値の比較	111
A.22	Old Burahmaputra 川 SW225 地点の水位実測値と計算値の比較	112
A.23	Haor (ハオール) SW269 地点の水位実測値と計算値の比較	113

表 目 次

2.1	メコン川中下流域の平均雨量 ^[36]	10
2.2	メコン川主要観測地点の流況 ^{[33][35]}	12
2.3	時系列傾向（経年変化）の分析結果（メコン川本川）	14
2.4	時系列傾向（経年変化）の分析結果（ラオス国内支川）	14
2.5	日雨量のしきい値超過日数の変化	17
2.6	水位のしきい値超過日数の変化	17
3.1	気象水文データセットと分析対象	22
3.2	バングラデシュ 35 観測所, インド 1 観測所における月降水量の変化傾向（1985 ～ 2016）	31
3.3	インド 7 地域の平均月降水量の変化傾向（1985 ～ 2016）	33
3.4	インド 7 地域と 1 地点の平均月降水量の変化傾向（1901 ～ 2016）	33
3.5	116 年間と 32 年間の変化傾向分析結果の地域別の比較	34
3.6	GBM と Haor 代表水位観測所の水位変化（1987 ～ 2016） Sens’Slope の値	38
3.7	GBM と Haor 代表水位観測所の水位変化（1987 ～ 2016）傾向	38
4.1	それぞれの時間差（lag）における回帰係数 \hat{B}	52
5.1	Try ら ^[101] による各種雨量データセットの精度比較	63
5.2	三大河川流域の RRI モデル諸元	70
5.3	三大河川の河川断面情報	72
5.4	Green-Ampt 鉛直浸透パラメータ一覧 ^[129]	72
5.5	再現計算ケースの設定	73
5.6	三大河川流域の RRI モデル改善事項	83

第1章 序論

1.1 研究の背景

近年、我が国では「これまでに経験したことのないような雨」「重大な危険が差し迫った異常な状況」などといった言葉が毎年聞かれるようになってきた。降水量や河川水位においては観測史上最大（最小）を記録するなどといった異常現象が頻発しており^[1]、年々、土砂災害、高潮、洪水あるいは渇水といった水災害の激甚化が著しくなっている^{[2][3][4]}。このような水災害の激甚化は、地球温暖化による気候変化が影響していると指摘されており^[2]、我が国のみならず世界に目を向けても状況は同じである。

図 1.1^[5] は、年間の洪水による死者数と 100 万人あたりの洪水による死者数の比を国ごとにプロットしたもので、その国の洪水に対する脆弱性を示している。この図から、東南アジア、南アジアの国々が上位に位置しており、これらの国々が水災害に対して脆弱であることが見てとれる。特に国際河川の中流域に位置し、河川工学の知識に乏しく国際協力での支援に頼り切りの開発途上国や、大河川の下流デルタ地帯に位置し、気候変動の影響を大きく受ける開発途上国等での水災害の状況は深刻であり、経済発展を妨げている最も大きな要因になっている^{[4][6]}。

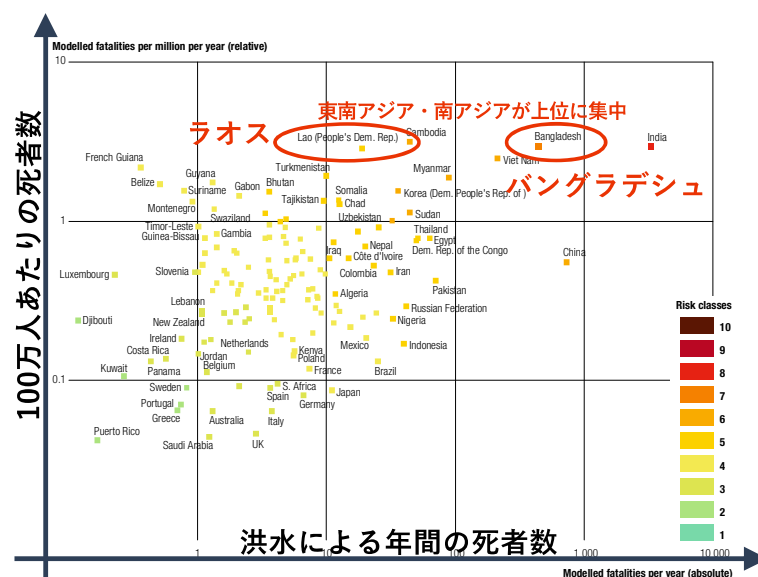


図 1.1 洪水に対する脆弱性評価

本研究は、東南アジア唯一の内陸国であるラオス人民民主共和国と、南アジアの大デルタ地帯に位置するバングラデシュ人民共和国の二か国を対象としたものである。東南アジアにおけるインドシナ半島の唯一の内陸国、ラオス人民民主共和国（以下ラオス）は、メコン川中下流域に位置し、国土の約80%がメコン川流域に属する。図1.2にメコン川流域図を示す。2005年～2010年の人口増加率は1.5%、GDP伸び率は7.7%を示し^[7]、電力、農業、水道事業、水運などの経済発展のインフラともいえる水資源としてのメコン川とその流域の役割はますます重要となっている。一方、メコン川は、歴史的に何度かの洪水や渇水を経験しているが、2008年の洪水（ビエンチャンで既往最高水位を記録）、2010年の渇水（ビエンチャンで上水道取水に影響）などに見られるように、近年、過去に経験したことのなかった洪水や渇水が頻発している^{[8][9][10][11][12]}。首都ビエンチャンや世界遺産ルアンパバンにおいても都市開発に伴う経済発展とともに洪水や渇水に対する脆弱性はますます大きくなり、今後、気候変動による気象水文量の変化に適応したインフラ整備を行うことが必要不可欠となっている。このため、メコン川流域の水資源や河川計画検討の基礎資料となる過去の水文データを分析する意義は大きい。

南アジア・ベンガル地域のバングラデシュ人民共和国は、ガンジス川（Ganges）、ブラマプトラ川（Brahmaputra）、メグナ川（Meghna）の3つの国際河川（総流域面積:172万km²、以下GBMという）の下流デルタ地帯に位置し、周りをインド、ミャンマーに囲まれた開発途上国である。図1.3にガンジス川・ブラマプトラ川・メグナ川流域図を示す。国土の約8割が洪水氾濫原であり、そのうちの約5割が標高5m以下の低平地であるため、年間降水量約2,200mmの約80%が集中する雨季（5月～10月）には、平均すると毎年国土の約2割が浸水している^[13]。バングラデシュでも水災害の状況は深刻であり、1998年の大洪水では国土の68%が浸水、特に近年では東北部のフラッシュ洪水や南東部の土砂災害での被害も深刻になっている^{[14][15]}。このような気象条件、洪水に対して脆弱な地形条件、1974年比で約2倍となった人口及び経済発展による社会環境の変化などの要因により、2004年6月の洪水では、3,600万人を超える被災者が発生し、約22億ドルの多大な経済被害が生じている^[16]。

水災害の激甚化は地球温暖化による気候変化が影響していると指摘されている^[2]ものの、開発途上国では水文観測データ収集に多くの困難が伴い、実観測データを用いてその地域の降水量や河川水位の長期的変化傾向とその要因を定量的に明らかにした研究成果は少ない。今後バングラデシュの水資源分野に対し効果的な国際協力を行うためには、水文観測データを入手し、それらの長期変化傾向と地球規模現象との相関・因果関係を明らかにしておくことが重要である。また、国土の約8割が氾濫原のバングラデシュにおいて、洪水やそれに伴う氾濫に最大の影響を及ぼす三大河川の流出氾濫シミュレーションモデルを構築し、過去の洪水を再現するとともに、流出氾濫形態の特徴と要因を明らかにすることが極めて重要である。また、モデルの精度が確保できれば、気候変動に伴う将来の流出氾濫予測も可能となる。さらには、近年の極端な気象現象の頻発化が地球温暖化の影響であると明らかになりつつある昨今において、モデルを活用して将来の流出氾濫予測を実施することが、将来の水災害対策計画を策定する上で必要不可欠となる。

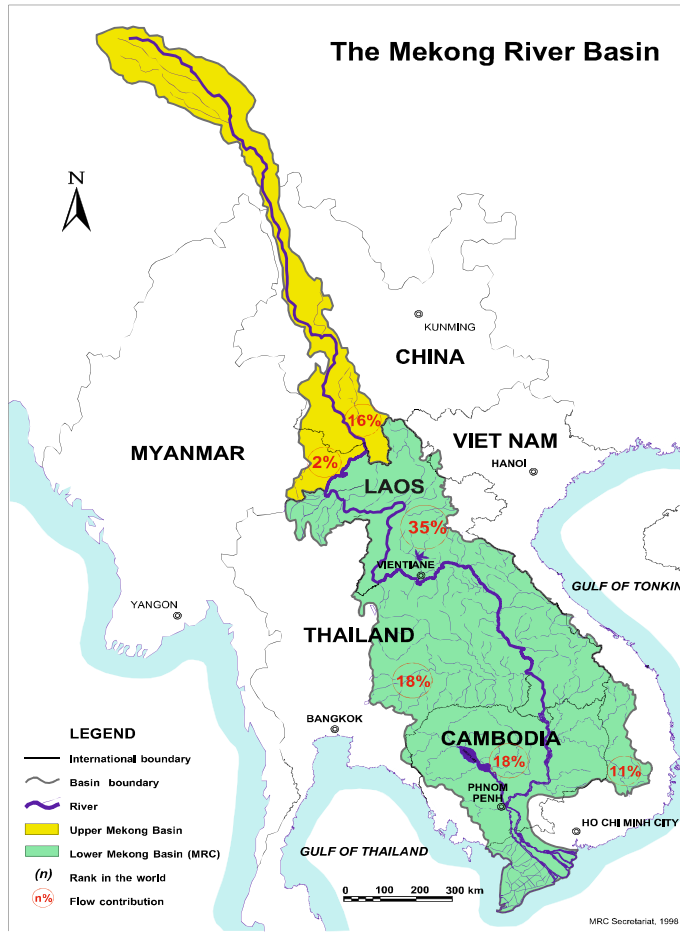


図 1.2 メコン川流域図

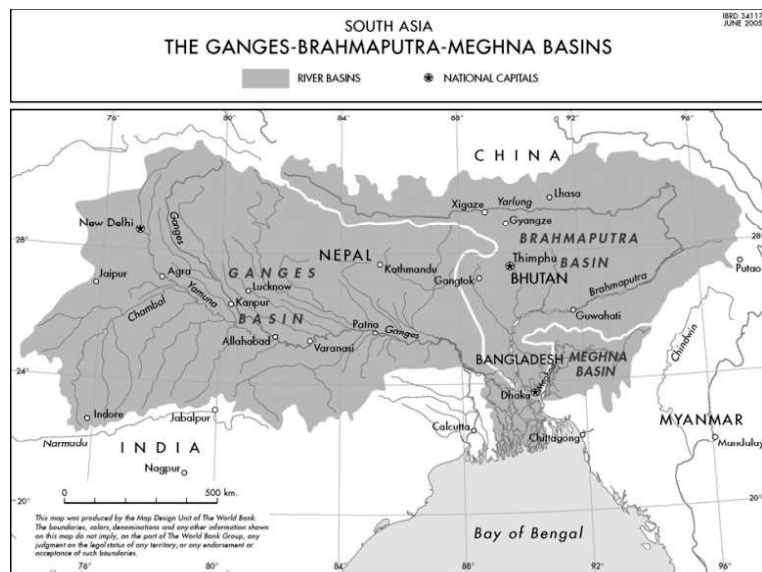


図 1.3 ガンジス川・ブラマプトラ川・メグナ川流域図

1.2 既往研究

東南アジアにおける気象水文データの長期変化傾向を研究したものとしては、Endoら^[17]が東南アジア各国における日雨量データ（1950～2000）の長期変化と極端現象の変化をMK検定で解析した例があり、1mm以上の降水量があった日数は減少傾向に、一方で平均雨量強度（mm/day）は増加傾向であることを指摘している。また、ベトナム南部とミャンマー北部で大雨が増加、ベトナム北部では大雨は減少傾向にあることも明らかにしている。しかしながら、Endoらの研究ではラオスにおけるデータが2箇所しか含まれておらず、メコン川の流量を支配する重要な本地域だけがデータの空白域になっており、トレンドが明らかになっていない。また、Yazidら^[18]は、地上観測値をグリッド化したデータセットのAPHRODITE（1960～2007）を用いて、インドシナ半島の日雨量データについて日雨量の閾値超過日数の変化傾向を分析しており、ラオス付近については、いずれも南部で有意な増加傾向にあることを明らかにしている。一方で、地上観測データを直接分析した既往研究や、河川の水位や流量に着目した研究は報告されていない。

南アジア、特にバングラデシュにおける類似研究としては、Endoら^[19]が1950年から2008年までの気象観測データ（降水量）を用いて長期変化と極端現象の変化をMK検定で解析した例があり、年間降水量については増減傾向はみられるものの、有意なトレンドはないことを明らかにしている。また、1mm以上の降雨があった日数については中部北部で有意な増加傾向があるが、10mm以上の降雨があった日数、年最大日雨量の経年変化は有意なトレンドは見られていない。一方で、河川水位について傾向を分析した研究は皆無である。

バングラデシュの水災害については、一部の河川流域で流出解析を行い国外からの流入量を推定し、洪水災害の要因を分析した先行研究^[20]があるが、現地調査・水文観測・データ収集には多くの困難が伴った、と述べている。中尾^[21]は、バングラデシュの治水計画のあり方について、流域の開発状況と洪水の特性をFAP（Flood Action Plan）^[22]と対比させ評価しているが、十分なデータが得られなかったことから洪水の定量的な解析精度を今後の課題としている。また、充実した水文データが得られれば、各水系の水文モデルもより精密になり、各種施策の評価をより確実に下せるようになると述べている。近年では、土木研究所の古谷ら^[23]が、バングラデシュの水災害について被災地域の社会経済構造・被災者の避難行動・被害軽減システムを分析することにより、被災の特徴から地域にあった被害軽減体制の強化方策を提案しているが、水文データに着目した要因分析については対象とされていない。また、Kwak^[24]は、MODIS衛星データを用いてバングラデシュ全土の浸水マップ作成手法を開発しているが、降水量や河川水位との関係までは述べられておらず、水文データを活用した浸水要因の分析までには至っていない。

1.3 研究の目的

本博士論文の研究は、統計学的手法を用いて降水量や河川水位の長期変化傾向や、地球規模現象のデータとの相関関係、あるいは因果関係を分析し、対象地域の気象水文現象に有意な変化や相関関係が見られるか否か、そして東南アジアと南アジアの傾向に違いがあるのかを明らかにすることを第1の目的としている。さらに、流出氾濫解析モデルを構築し、国際河川流域の洪水氾濫を再現するとともに、対象地域の洪水の源や原因を明らかにすること、また、第1の目的で明らかにした結果を用いて、将来の流出量、洪水氾濫の変化を分析することを第2の目的としている。その結果から将来の国際協力に資する結論を得ることを最終目的としている。

研究を進めるにあたり、ラオスでの研究については第2章に、バングラデシュでの研究については第3章、第4章、第5章に整理した。最後に、第6章においては総合的考察として、ラオス、バングラデシュの気象水文量のトレンド解析や流出氾濫再現計算から得られた結果についてとりまとめ、今後の課題についても著者の見解を整理し提案した。

1.4 本論文の構成

本論文は、水災害に対し脆弱な国土を有する開発途上国を対象に、降水量・河川水位等の水文学の長期変化や気候変動との因果関係、および河川流域毎の流出特性や洪水氾濫の過程を探求するため、t検定やMann-Kendall検定を用いて気象水文観測データを解析、さらには、大河川流域の降雨流出氾濫(RRI)モデルを用いて流出量、洪水氾濫の解析を行い、開発途上国の水災害について総合的に考察したものを研究成果としてまとめたものである。

研究対象フィールドには、国際河川の中流および下流域に位置し、特殊な地形を有し複雑な河川ネットワークを持つ、あるいは、ダム等での洪水調節が現実的に不可能な開発途上国に着目し、世界で最も水災害リスクの高い南アジアのバングラデシュ、そして、水災害リスクは高いが対策にあまり力を入れてこなかった東南アジアのラオスの2カ国を対象とした。

第1章は、本研究に関する背景、目的、構成を示している。

第2章では、ラオスの経済活動になくはならない存在であるメコン川流域(本川、支川)の降水量、河川水位の長期変化傾向について述べる。時系列データについては、統計学的解析手法t検定、閾値超過分析、極値解析手法を使って分析した。

第3章では、水災害に対し世界で最も脆弱な国土を有しているバングラデシュと周辺のベンガル地域における、降水量、河川水位の長期変化傾向について述べる。時系列データについては、統計学的解析手法Mann-Kendall検定、Seasonal Mann-Kendall検定を使って分析した。なお、ここではMann-Kendall検定の弱点を克服するために、STLを使った平滑化手法を新たに提案し、その有用性を確認している。

第4章では、エルニーニョおよびインド洋ダイポールに関する指数SOI、DMIと降水量との相関・因果関係について述べる。統計学的解析手法Wavelet、Cross-Waveletコヒーレ

ンス、統計的因果推論の手法の一つである VAR-LiNGAM を使って分析した。なお、統計学的因果推論手法を気象水文データに適用した既往研究は、筆者が知る限り存在せず、本研究においてはじめて適用可能であることと、その有用性を確認している。

第 5 章では、バングラデシュの水災害について、降雨流出から洪水氾濫までを流域一体で解析する降雨流出氾濫モデルの RRI (Rainfall Run-off Inundation Model) を用いてガンジス・ブラマプトラ・メグナ川の三大河川流域モデルを構築し、近年の洪水を再現、観測データと比較するとともに、降雨分布と照らし合わせ洪水の要因を分析した。また、氾濫についても同時に分析し、モデルの再現性を検証した。さらに、第 3 章の結果を用いて将来の水文量および氾濫域や浸水深の変化を解析した。

最後の第 6 章では、第 2 章から第 5 章の総合的な考察と、今後の展望を整理した。開発途上国における将来の水災害対策を計画する上で、必要不可欠な流出氾濫解析モデルの必要性やモデルを用いた将来の水災害リスク予測の重要性等の提言をまとめた。

参考文献

- [1] 国土交通省：水害レポート 2018，国土交通省水管理・国土保全局，2018.
- [2] 気候変動による水害研究会，日経コンストラクション編：激甚化する水害，日経 BP 社，2018.
- [3] 青野正志：水関連災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について，水利科学，52 巻 2 号，pp. 1-27，2008.
- [4] 今村能之：世界の洪水リスクの現状と将来見通し，Safety Eye Neo, No. 12, pp. 2-17, 損保ジャパン日本興亜リスクマネジメント，2015.
- [5] United Nations: Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction, United Nations International Strategy for Disaster Reduction Secretariat (UNISDR), 2009.
- [6] 社会資本整備審議会：水災害分野における気候変動適応策のあり方について（答申），社会資本整備審議会，2015.
- [7] The World Development Bank: World Development Indicators, <http://data.worldbank.org/data-catalog/world-development-indicators>, 2011
- [8] Mekong River Commission: Annual Flood Report 2005, 2006.
- [9] Mekong River Commission: Annual Flood Report 2008, 2009.
- [10] Mekong River Commission Secretariat: Flood Situation Report August, 2008, 2008.
- [11] Mekong River Commission: Annual Flood Report 2009, 2010.
- [12] Mekong River Commission: Annual Flood Report 2010, 2011.
- [13] 村岡和満：バン格拉デシュの河川と水災害対策，雑誌河川，2016 年 9 月号，pp. 104-108, 2016.
- [14] Bangladesh Water Development Board: BWDB Annual Report 2015/2016, Bangladesh Water Development Board, 2016.
- [15] Baten, A., Gonzalez, P. A. and Delgado, R. C.: Natural disasters and management systems of Bangladesh from 1972 to 2017: Special focus on flood, *OmniScience: A Multi-disciplinary Journal*, Vol. 8, Issue 3, pp. 35-47, 2018.
- [16] 国際協力機構：持続的な水関連インフラ整備に係る能力向上プロジェクト，プロジェクト事業完了報告書，2017.
- [17] Endo, N., Matsumoto, J. and Lwin, T.: Trends in Precipitation Extremes over Southeast Asia, *SOLA*, Vol. 5, pp. 168-171, 2009.

- [18] Yazid, M. and Humphries, U.: Regional Observed Trends in Daily Rainfall Indices of Extremes over the Indochina Peninsula from 1960 to 2007, *Climate*, Vol. 3, pp. 168-192, 2015.
- [19] Endo, N., Matsumoto, J., Hayashi, T., Terao, T., Murata, F., Kiguchi, M., Yamane, Y. and Alam, M. S.: Trends in Precipitation Characteristics in Bangladesh from 1950 to 2008, *SOLA*, Vol. 11, pp. 113-117, 2015.
- [20] 岡太郎：バンングラデシュの洪水災害，京都大学防災研究所年報，第 47 号 A, pp. 59-80, 2004.
- [21] 中尾忠彦：バンングラデシュの治水計画に関する研究，東京大学学位論文，1997.
- [22] Netherlands Development Cooperation: Flood action plan, *Bangladesh, Evaluation Report*, 1993.
- [23] 古谷純一，竹本典道，タレク・メラブテン：バンングラデシュにおける水災害に関する要因分析，土木研究所資料，第 4052 号，2007.
- [24] Kwak, Y.: Nationwide flood monitoring for disaster risk reduction using multiple satellite data, *International Journal of Geo-Information*, pp. 1-12, 2017, 6, 203;doi:10.3390 /ijgi6070203

第2章 メコン川中下流域における長期水文 データの変化傾向

2.1 メコン川流域の背景

東南アジアにおけるインドシナ半島の唯一の内陸国、ラオス人民民主共和国（以下ラオス）は、メコン川中下流域に位置し、国土の約80%がメコン川流域に属する。2005年～2010年の人口増加率は1.5%、GDP伸び率は7.7%を示し^[24]、電力、農業、水道事業、水運などの経済発展のインフラともいえる水資源としてのメコン川とその流域の役割はますます重要となっている。

メコン川は歴史的に何度かの洪水や渇水を経験しているが、2008年の洪水（ビエンチャンで既往最高水位を記録）、2010年の渇水（ビエンチャンで上水道取水に影響）などに見られるように、近年、過去に経験したことのなかった洪水や渇水が頻発している^{[25][26][27][28][29]}。首都ビエンチャンや世界遺産ルアンパバンにおいても都市開発に伴う経済発展とともに洪水や渇水に対する脆弱性はますます大きくなり、今後、気候変動による気象水文量の変化に適応したインフラ整備を行うことが必要不可欠となっている。このため、メコン川流域の水資源や河川計画検討の基礎資料となる過去の水文データを分析する意義は大きい。

JICA（国際協力機構）は2001年から2004年にかけて、「メコン河流域水文モニタリング調査」を実施し、メコン川水系の流況を明らかにした^[30]。また、水文観測網の整備、過去の雨量データの欠測補填、水文モニタリングシステムの提言を行っている。また、森ら^[31]は、メコン川流域の水文特性を把握する基礎資料としての水収支とその変化の特徴についてタイ国のメコン川ムクダハン地点において検討し、降水量、流出高について減少傾向であると指摘している。風間ら^[32]は、メコン川下流域のカンボジアを中心に水文現象の特徴を述べ、土地利用形態毎の水収支解析から流出量を計算し、土地利用の変化が流出量に与える影響を評価している。

しかしながら、ラオスは国土の約80%がメコン川流域に属するにもかかわらず、メコン川中下流域の降水量や流出量などの変化傾向について詳細に検討されてこなかった。この地域における将来の流域開発や発展においてメコン川は重要な役割を占めているが、気候変動によってメコン川の洪水や渇水が頻発することが益々懸念される。したがってメコン川中下流域の水文学的特性を把握しておくことは重要なことと言える。

本章では、ラオスを中心としたメコン川中下流域を対象として、メコン川本川および支川流域の雨量、流量水位の長期間水文データ^{[33][34]}（後述のように観測所によって異なるが

表 2.1 メコン川中下流域の平均雨量 [36]

Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
8	15	40	77	198	241	269	292	299	165	54	14	1,672

(mm)

最大 92 年間、最小で 16 年間) を用いて、これら水文量の統計分析を行った。

2.2 メコン川の概要

メコン川は、その源をチベット高原の唐古拉山脈東部の湿地ルプ・サ・パス地点（標高 4,975m）に発し、中国雲南を経てインドシナ半島中央部を南に流下し、ベトナム南部で南シナ海に注ぐ。流域は中国、ミャンマー、ラオス、タイ、カンボジア、ベトナム 6 カ国を含み、延長 4,425km、流域面積 79 万 5,500km² で東南アジア最大の国際河川である [35]。その流域図を図 2.1 に示す。中下流域の気候は、11 月から 5 月初旬までの北東モンスーンの影響を受け乾季となり、5 月中旬から 10 月までは南西モンスーンの影響を受け雨季となる。中下流域の平均雨量は 1,670mm 程度（表 2.1）で、年間の約 88% が雨季に集中している。したがって、メコン川の最大流量は 8 月から 10 月に、最小流量は 3 月から 4 月に発生し、ラオスの首都ビエンチャン（河口から 1,584km）における雨季と乾季の水位差は 10m 以上にも達する。

2.3 流況の分析

Mekong River Commission（メコン川委員会）より入手した過去の水文観測データから、メコン川の主要な観測地点 6 ヶ所の年平均流出量と雨季と乾季に分けた平均流出量を計算した。その結果を表 2.2 に示す。なお、雨季を 6 月 1 日から 10 月 31 日まで、乾季を 11 月 1 日から 5 月 31 日までとした。図 2.2 に主要観測地点の比流量を示す。年間および雨季は下流にいくほど比流量が増加しており、ラオスにおける流出が大きく寄与していることがわかる。これらの流出は、ラオスのアンナン山脈やボラヴェン高原に降ったモンスーン性降雨によるものである [33][37]。ラオス領内に 22,178km² の流域面積を持つセコン川はカンボジアの Stung Treng 観測所の手前で合流しており、その流出のほとんどはラオス起源であるといえる。Stung Treng においてラオスからの流出率を計算すると、年間、雨季においては約 70% 以上となる。乾季の比流量は各地点でほぼ一定であり、特徴はみられなかった。そこで、平均渇水流量から比流量を計算し、プロットすると、明らかに下流にいくほど減少していることがわかった。すなわち、渇水時における主な支配要因は、上流部中国からの供給であることが分かる。



図 2.1 メコン川流域図と主要観測地点 [35]

表 2.2 メコン川主要観測地点の流況 [33][35]

距離 (km)	観測地点	流域面積 (1,000km ²)	観測期間	年平均流出量 (m ³ /s)	雨季平均流出量 (m ³ /s)	乾季平均流出量 (m ³ /s)
2,364	ChaingSean	189,000	1960-2007	2,700	4,619	1,319
2,010	LuangPrabang	268,000	1950-2006	3,826	6,698	1,756
1,584	Vientiane	299,000	1920-2011	4,516	8,069	1,960
864	Pakse	545,000	1923-2006	10,117	19,451	3,388
682	StungTreng	635,000	1910-2004	13,382	26,055	4,261
560	Kratie	646,000	1924-1970	14,013	27,429	4,449

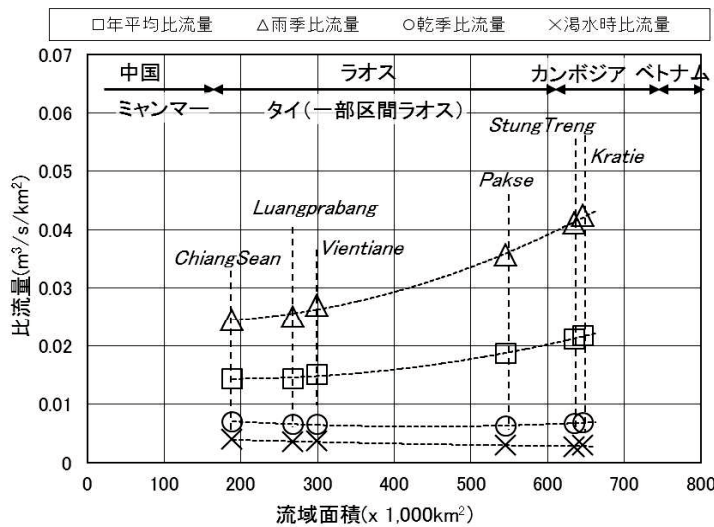


図 2.2 メコン川主要観測地点の比流量 [33][35]

2.4 降水量・流量の時系列変化傾向の分析

2.4.1 年間降水量の変化傾向

ラオス国内の雨量観測所 63 地点の過去の日雨量データから年間降水量を求め、その経年変化の傾向を分析した。入手したデータは欠測補填、異常値処理などの照査が施されている。よって時系列データの変化傾向を分析する手法には、回帰係数の有意性判定 (t 検定) を用いることとした、求めた信頼区間について、5%水準以内で正 (負) であれば「有意な増加 (減少) 傾向」、5%より大きく 34%水準以内で正 (負) であれば「有意でないが増加 (減少) 傾向」[39]、それ以外を「有意な傾向はない」とした。結果を図 2.3 に示す。全 63 観測所のうち、ラオス中部に位置するナムトゥン流域の 3 観測所については、データ蓄積期間が 10 年未満であるため分析対象から除外した。分析した全 60 観測所のうち、約 40%の 26 地点が減少傾向で、うち 11 地点が「有意な減少傾向」であった。また、そのほとんどが南部に集中しており、特にセバンファイ、セバンヒアン、セドン流域で顕著に現れている。中部北部では、ナムタ流域、ビエンチャン平野の周辺で「有意な増加傾向」が見られるものの、ナムベン流域、サイニャブリでは「有意な減少傾向」も見られ、全体的には「有意な傾向は

ない」との判断となった。

以上より、ラオスにおける年間降水量は、南部において「有意な減少傾向」、中部北部において「有意な傾向はない」であることがわかった。このことは、インドシナ半島で最も降水量の多いラオス南部、特にボラヴェン高原を中心に気候変動の影響を大きく受けているものと考えられる。

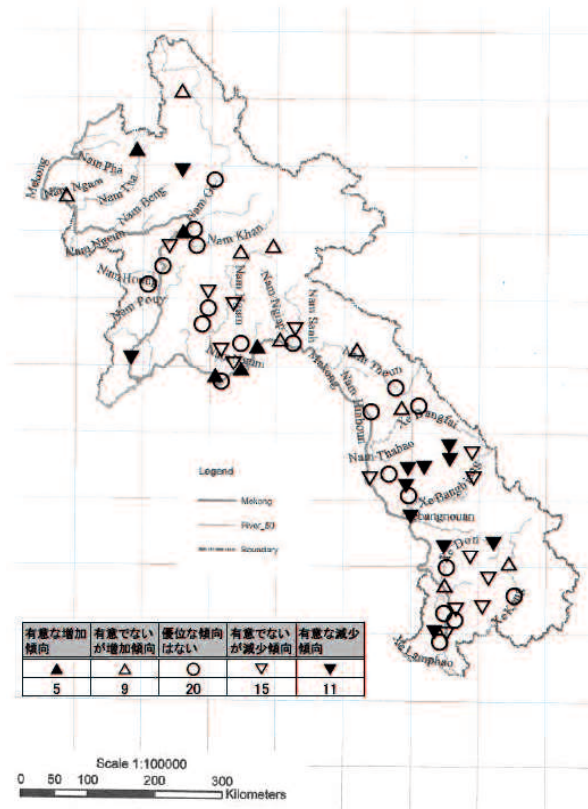


図 2.3 年間降水量の経年変化傾向 [38]

2.4.2 メコン川本川および支川の流量変化傾向

メコン川本川の主要観測所 8 地点とラオス国内の 13 支川の流量変化傾向を分析した。内、北部の 2 支川のナムタ川とナムベン川については観測データが存在していないため、今回の分析からは除外した。観測データは、長いところで 1920 年から 2011 年までの 92 年間、短いところで 1986 年から 2002 年までの 16 年間である。流量は、年平均流量、雨季平均流量（6 月 1 日～10 月 31 日）、乾季（11 月 1 日～翌年 5 月 31 日）、さらに渇水流量を観測所毎に求め、変化傾向を評価した。表 2.3 にメコン川本川の分析結果を、表 2.4 にラオス国内支川の分析結果を示す。また、図 2.4 に年平均流量の、図 2.5 に渇水流量の変化傾向をそれぞれ図示した。

年平均流量は、本川、支川ともに「有意な傾向はない」または「有意な減少傾向」である。本川のサワンナート地点と支川のセバンファイ地点においては、「有意な減少傾向」と分析

表 2.3 時系列傾向（経年変化）の分析結果（メコン川本川）

観測地点	流域面積 (1,000km ²)	観測期間	年平均流量 の傾向	雨季平均流量 の傾向	乾季平均流量 の傾向	渇水流量 の傾向
ChaingSean	189,000	1960-2007	▽	▽	○	○
LuangPrabang	268,000	1950-2006	○	○	△	▽
Vientiane	299,000	1920-2011	▽	▼	○	○
Thakhek	373,000	1923-2006	○	○	▲	▲
Savannakhet	391,000	1923-2006	▼	▼	○	▲
Pakse	545,000	1923-2006	▽	▼	○	▲
StungTreng	635,000	1910-2004	○	▽	△	▲
Kratie	646,000	1924-1970	○	○	○	▽

▲：有意な増加傾向，▼：有意な減少傾向，△：有意でないが増加傾向，▽：有意でないが減少傾向
○：有意な傾向はない

された。これは、ラオス南部における年間降水量の傾向と一致している。中部北部の本川の年平均流量の傾向については、年間降水量の傾向と一致していない。本研究では、上流部中国の降水量を分析していないため、ここで関連付けることはできなかった。

雨季平均流量は、ビエンチャンから下流の本川において「有意な減少傾向」となった。これは、年間降水量の傾向とも一致するが、もう一つの理由として、支川のナムグム流域等での水力発電ダムで、乾季での発電用水を雨季に貯める運用の影響が考えられる。実際に支川のナムグム流域では、NamNgum1 ダムの運用が開始された1971年に、流量が急激に変動する“ジャンプ”が見られ、ジャンプ後の分析においても「有意な減少傾向」となっている。

渇水流量の傾向は、ターククから下流の本川で「有意な増加傾向」で、ここでも乾季において水力発電ダムからの安定的な発電放流が寄与していると考えられる。支川でも、水力発電ダムの存在するナムグム川（運用開始1971年）、セドン川（運用開始1991年）、セコン川（運用開始1999年）において運用開始年を境にジャンプがみられる。ジャンプ後の分析でも「有意な増加傾向」または「有意ではないが増加傾向」となった。

表 2.4 時系列傾向（経年変化）の分析結果（ラオス国内支川）

支川	観測所	流域面積 (km ²)	観測期間	年平均流量 の傾向	雨季平均流量 の傾向	乾季平均流量 の傾向	渇水流量 の傾向
NamOu	MouangNgoy	24,673	1986-2003	▲	▲	▲	△
NamSuong	Ban Sibounhom	6,578	1967-2004	▼	▼	▼	▽
NamKhan	Ban Mixay	7,490	1960-2005	▽	○	▼	▼
NamNgum	Pakhayoung	16,906	1963-2006	○	▼	▲	▲
NamNgiep	Muong Mai	4,577	1986-2005	△	△	△	○
NamSane	Muong Borikhane	2,226	1985-2005	▽	○	▽	▽
NamKadinh	Ban Phone Sy	14,820	1984-1986	3年間のみの観測のためデータ不足			
NamKadinh	Ban Signo		1986-2005	○	△	▼	○
SeBangfai	Se Bang Fai	10,345	1960-2004	▼	▼	▼	△
SeBanghieng	Ban KengDone	19,223	1960-2004	○	○	△	○
Sedone	Khong Sedone	7,729	1989-2005	△	△	△	▲
Sekong	Attapeu	22,179	1986-2002	○	○	△	△

▲：有意な増加傾向，▼：有意な減少傾向，△：有意でないが増加傾向，▽：有意でないが減少傾向
○：有意な傾向はない



図 2.4 メコン川本川，支川の
年平均流量変化傾向



図 2.5 メコン川本川，支川の
洪水流量変化傾向

2.4.3 洪水時および渇水時の流量変化傾向

ビエンチャン地点において、洪水時および渇水時の流量変化傾向を分析した。洪水時の分析には年最大流量，渇水時の分析には渇水流量を評価した。分析結果を図 2.6～図 2.7 に示す。各年の値に対する回帰直線が灰色線，観測値の 5 年移動平均が黒い実線である。また，年最大流量，渇水流量の変動幅の変化傾向を破線に示した。年最大流量，渇水流量ともに減少傾向であるが，1951 年から 2010 年まで 30 年間毎の標準偏差をとると，年最大流量については前半で 3186.3，後半で 3257.8，渇水流量については前半で 138.6，後半で 159.5 と，いずれも増加しており，変動幅が大きくなっていることがわかる。

近年，ビエンチャンでは実際に洪水，渇水が交互に現れ，2008 年 8 月には既往最高水位を観測し，メコン川沿いの低い場所では一週間にもわたる冠水被害が発生した。2010 年 2 月～4 月には渇水で水位が水道取水水位以下となり，台船にポンプを設置して臨時取水するなど，上水道施設に影響を与えた。また，このときは上流のフェイスールアンパバン間で，渇水による水位低下の影響で航路確保ができなくなり，定期運航の旅客船が約 1 ヶ月間運休となっている。

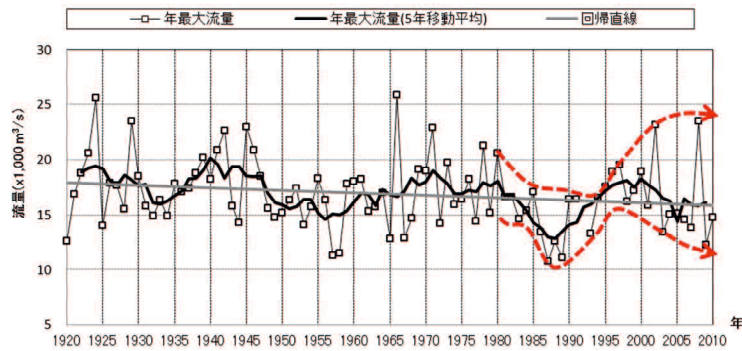


図 2.6 ビエンチャン地点の年最大流量変化傾向

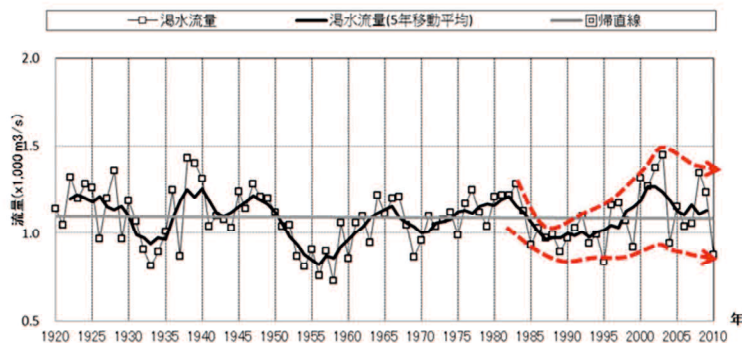


図 2.7 ビエンチャン地点の洪水流量変化傾向

2.4.4 しきい値超過回数分析

(1) 日雨量のしきい値超過回数

年間発生数の少ない現象は、分析対象とする期間を前後半等に分け、それぞれの期間での発生回数を比較することが有効である^[40]。観測所地点毎のしきい値超過回数を10地点あたりに規格化し、流域毎にとりまとめて評価した。分析対象期間を、信頼できるデータが存在している1969年～2008年までの40年間とし、有意性検定は行わず、前半(1969年～1988年)と後半(1989年～2008年)のしきい値超過回数(水位は日数)を比較した。ここでは、しきい値を日雨量50mmと100mm、各観測所の洪水水位(Flood Level)、注意水位(Alarm Level)とした。ラオス国内のメコン川流域南部・中部・北部と各支流域における雨量観測所において観測された日雨量のしきい値超過回数の変化を表2.5に示す。観測期間が40年に満たない流域は分析対象から除外した。100mmを超える日雨量の観測回数は、メコン川本川流域と北部中部の支流域(ナムウー、ナムグム流域)では増加となり、南部の支流域では減少となった。50mmを超える日雨量の観測回数は、中部の流域で若干増加しているものの、大きな変化は見られなかった。2.4で述べたように、年間降水量は一概に減少傾向であるものの、日雨量100mmを超える降雨の回数は増加しており、日本でみられるような

表 2.5 日雨量のしきい値超過日数の変化

Tributary	1969-1988		1989-2008	
	50mm / 日	100mm / 日	50mm / 日	100mm / 日
Mekong (南部)	111.2	9.1	114.4	15.4
Mekong (中部)	120.8	9.0	126.5	16.5
Mekong (北部)	52.1	4.0	45.0	4.9
NamOu	35.0	4.0	53.0	7.5
NamNgum	138.7	4.5	144.2	12.5
SeBanhieng	102.0	12.5	98.8	9.5
Sedone	103.5	16.5	100.5	8.5
Sekong	98.5	18.0	100.0	11.5

単位 (回 / 10 地点 / 年)

表 2.6 水位のしきい値超過日数の変化

	1969-1988		1989-2008		変化率	
	注意水位	洪水水位	注意水位	洪水水位	注意水位	洪水水位
ChiangSean	0	0	0	0	0%	0%
Luangprabang	36	19	15	10	-58%	-47%
Vientiane	48	19	27	13	-44%	-32%
Thakhek	150	70	120	50	-20%	-29%
Savannakhet	59	21	18	0	-69%	-100%
Pakse	210	52	209	72	0%	38%

(単位：日)

極端な気象現象がラオスのメコン川流域でも同様に発生している。実際に近年において、ラオス山岳地帯でのフラッシュ洪水被害が毎年報告されている。

(2) 水位のしきい値超過日数

ラオス国内のメコン川本川の主要観測所 6 地点について分析した結果を表 2.6 に示す。パクセおよびチェンセーン以外はいずれも、過去 40 年間で比較すると洪水日数は減少している。

2.4.5 年最大流量と濁水流量の極値解析

洪水や濁水等の数年に一度しか発生しない現象のリスク評価には、極値分析が有効である [41]。本章では、2.4 において、ビエンチャン地点の流量データの非定常性を指摘したが、期間を分割することで定常性が確保されると考え、年最大流量と濁水流量に対して極値分析を実施した。極値分析には、「水文統計ユーティリティ Ver.1.518」 [41] を用い、13 種類のモデルのうち $SLSC \leq 0.04$ 以下で最も $SLSC$ が小さいモデルの推定値を採用した。

メコン川ビエンチャン地点における年最大流量と濁水流量を、気象分野で基準としている

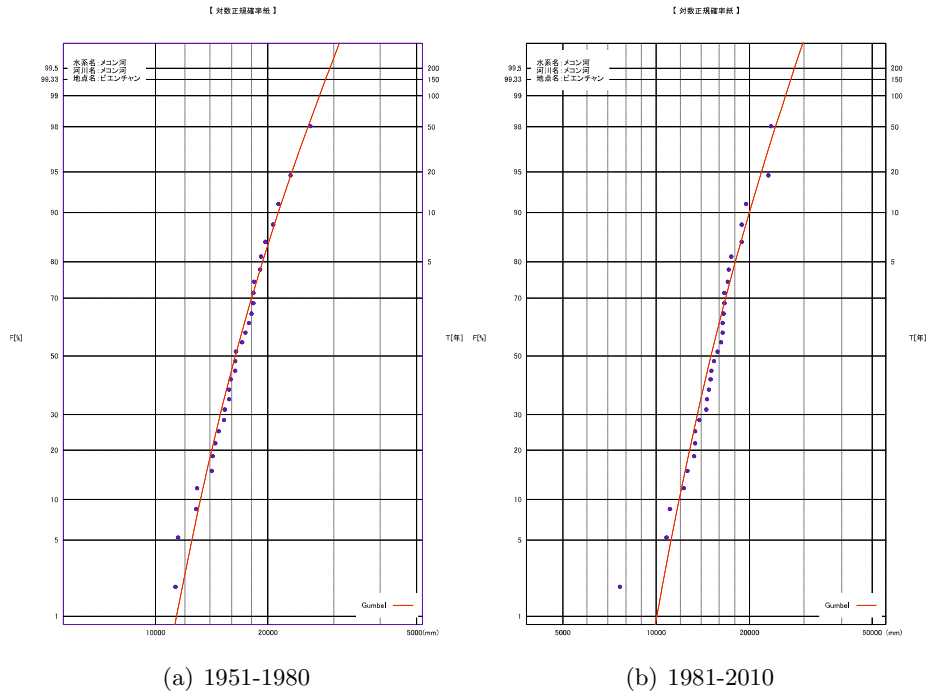


図 2.8 年最大流量の極値分析（ビエンチャン地点）

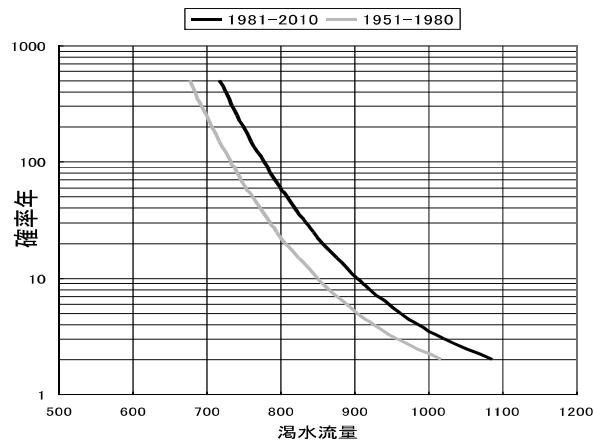


図 2.9 渴水流量の極値分析（ビエンチャン地点）

30 年を分析期間とし、期間の前半（1951 年～1980 年）と後半（1981 年～2010 年）に分けて、それぞれの期間の確率規模分析を行った。その結果を図 2.8，図 2.9 に示す。年最大流量は、確率年 10 年で前半 $21,253\text{m}^3/\text{s}$ から後半 $20,018\text{m}^3/\text{s}$ 等、いずれの確率年に対しても減少傾向にあり、渴水流量は、いずれの確率年に対しても増加傾向となった。これは、洪水リスク、渴水リスクの減少を示唆しているが、標準偏差を見ると 2.4.3 で分析した結果と一致しており、ばらつきは大きくなっている。

2.5 本章のまとめ

本章で得られた主要な結論を以下に示す。

- 1) メコン川本流の主要観測地点の年平均流量，雨季平均流量から比流量を求めた結果，ラオスからの流出が約 70%と大きく寄与していることがわかった。また，渇水流量から比流量を求めた結果，渇水時は上流部中国からの流入に支配されることがわかった。
- 2) 年間降水量および流量は減少傾向であり，年間降水量は，特に南部において「有意な減少傾向」であることがわかった。
- 3) 渇水流量は，ラオス北部で減少傾向，ラオス中部から南部で増加傾向であることがわかった。このことは，近年ラオス中部や南部で開発された，NamNgum1 ダムなどの水力発電ダムの発電水放流が乾季の渇水流量の増加に寄与しているものである。
- 4) 洪水流量，渇水流量はやや減少傾向であるが，年々変動幅がおおきくなっており，洪水や渇水のリスクが高まってきている。
- 5) 年間降水量は減少傾向であるが，日雨量 100mm を超える降雨は増加傾向である。これは近年山岳地帯でのフラッシュ洪水の増加の原因にもなっている。
- 6) 洪水水位，注意水位を超える日数は，パクセーが最も多い。また，パクセー，チェンセー以外の地点は，過去 40 年間の比較において減少している。

参考文献

- [24] The World Development Bank: World Development Indicators, <http://data.worldbank.org/data-catalog/world-development-indicators>, 2011
- [25] Mekong River Commission: Annual Flood Report 2005, 2006.
- [26] Mekong River Commission: Annual Flood Report 2008, 2009.
- [27] Mekong River Commission Secretariat: Flood Situation Report August, 2008, 2008.
- [28] Mekong River Commission: Annual Flood Report 2009, 2010.
- [29] Mekong River Commission: Annual Flood Report 2010, 2011.
- [30] 独立行政法人国際協力機構, メコン川委員会: カンボジア, ラオス, タイ, ベトナム国メコン河流域水文モニタリング計画調査報告書, 2004.
- [31] 森 和紀, 一柳錦平: メコン河流域の水収支とその経年変化, 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, No.29, pp. 101-108, 2004.
- [32] 風間総, 沢本正樹, NAWARATHNA, NMNS Bandara: メコン川流域の水資源評価に関する基礎的研究, 水工学論文集, 第 45 巻, pp. 19-24, 2001.
- [33] Mekong River Commission Secretariat: Hydrological and Meteorological Dataset, 2012.
- [34] Mekong River Commission Secretariat, Kazumitsu M: MRC Non-commercial Data Use License Agreement, August, 2012.
- [35] 増本隆夫, 森下甲子弘: メコン河下流域における水文気象観測網の現状と課題, 水利科学, No.311, pp. 52-76, 2010.
- [36] 堀 博: メコン河開発と環境, pp .26, 古今書院, 1996.
- [37] 笠井利之: メコン川流域の開発と環境を考える, 立命館国際研究 15-3, pp. 201-224, 2003.
- [38] Department of Meteorology and Hydrology, Water Resources and Environment Administration: River and Watershed in LAO PDR, 2008.
- [39] Intergovernmental Panel on Climate Change: Guidance Notes for Lead Authors of the IPCC Fourth Assessment Report on Addressing Uncertainties, July, 2005.
- [40] 山口河川国道事務所: 佐波川水系気候変化モニタリング検討業務報告書, 2010.
- [41] 財団法人国土技術研究センター: 水文統計ユーティリティ Ver1.5, 2003.

第3章 ガンジス川下流域における長期水文 データの変化傾向

3.1 はじめに

本章では、バングラデシュ気象局 (Bangladesh Meteorological Agency), バングラデシュ水開発庁 (Bangladesh Water Development Board) より提供を受けた降水量, 河川水位流量等の気象水文データ [42][43] を用いて, 長期変化傾向と変動の特徴を明らかにすることを目的とした. 具体的には, 1) バングラデシュ 32 年間の月降水量の長期変化傾向, 2) インドを含めた月降水量 116 年間 [44] と近年 32 年間の変化傾向の比較, 3) 降水量の閾値分析による極端な気象の変化傾向, 4) 三大河川 (GBM) 30 年間の水位の長期変化傾向についてそれぞれ分析した. 月降水量, 河川水位等の季節周期性をもった時系列データを解析する際は, Loess 法 [45] を用いて周期成分を除去するとともにトレンド成分を抽出し, Mann-Kendall 検定 [46][47][48][49][50] を用いて長期的変化傾向の分析を行った.

3.2 既往研究

気候変化に関する研究では, 気象水文データの長期変化傾向を分析するための手法として, 移動平均法などにより時系列を平滑化し, t 検定で回帰直線の傾きの有意差を求める手法があり, メコン川中流域の水文時系列データの長期変化傾向を分析した研究例 [51] がある. しかし, 第1章で述べたように水災害の激甚化が著しくなっていることを考慮すると, 水文時系列は非定常性過程として統計解析を行うことが望ましい [52] と考えられる. 最近では, 非定常性の検定手法として, ノンパラメトリック法である Mann-Kendall 検定を用いることが一般的であり [53], これまで多くの研究が行われている. 例えば西岡・寶 [54] は, 日雨量が 100 年間で 25% 増加する系列の場合, 90% の確からしきで傾向変動をもつと判断するためには, 100 年間のデータが必要であることを示している. しかし, バングラデシュでの観測データの蓄積年数は高々 32 年程度である. 従って, 変化傾向を感度良く検出するためには, 時系列の時間方向に対するフィルタリングなど, なんらかの工夫が必要である.

ベンガル地域においては, 一部の地域で気象水文観測データの変化傾向を分析した先行研究があり, 例えば Lairenjam ら [55] は, インド東北部の気象観測所 30 箇所の降水量, 平均気温, 雨の日数等について約 30 年間の長期変化傾向を分析し, 有意な変化があることを明らかにしている. このようにいくつかの先行研究があるが, いずれも一部の地域を対象とし

たものであり、ベンガル地域全体の観測データを統合的に解析した研究例はない。

バングラデシュはベンガル湾からの強い南西モンスーンの影響を直に受ける地域である。日本の梅雨前線は、ベンガル湾の暖かく湿った大気が、チベット高原の南側をまわるモンスーン気流によって中国大陸の華中・華南を経由して日本付近に流れてくることによって形成されることを考慮すると、この地域の気候変化、すなわち長期水文観測データの傾向を分析把握することは、バングラデシュのみならず日本の気候変化を解明する上でも極めて重要である。

3.3 ベンガル地域の気象水文データと洪水の状況

3.3.1 気象水文データ

バングラデシュでは様々なドナーの協力のもと、これまで蓄積されてきた観測データが電子化されたデータベースとして整備されてきている [56][57]。データ入手は比較的容易になってきているものの、データ取得のためのコストが高価であるため、全てのデータを取得するのは未だ困難な状況である。一方、インドの気象水文観測の歴史は古く、データの蓄積期間は100年以上と比較的充実しており、州や管区毎の月平均や年平均など、後処理されたデータは公開されているものの、日雨量等の詳細な観測データ（生データ）の取得には高いコストや煩雑な手続きが必要となり事実上の困難を伴う。

本章の研究では表 3.1 に示すとおり、バングラデシュからは観測値である生データを、インドからはインド熱帯気象研究所で公開されている観測値を統計処理した加工済みデータ [44] を入手した。観測期間はインドでは100年以上、バングラデシュでは約30年であり蓄積期間に差があるため、例えば、相関・因果分析等、複数のデータを比較する分析項目では、それぞれのデータの期間を統一させた。

表 3.1 気象水文データセットと分析対象

データの種類	国	観測所数 (地域)	データ期間 (欠測期間含む)	観測所数 (地域)	分析対象 データ期間	Data Source
気象	Bangladesh	35	32年(1985~2016)	35	32年(1985~2016)	BMD
		268	31年(1987~2017)			
	India	1	116年(1901~2016)	1	116年(1901~2016)	IMD
	India	(27)	146年(1871~2016)	(7)	116年(1901~2016)	IMD
水文	Bangladesh	216	31年(1987~2017)	4	30年(1987~2016)	BWDB
気候変動	-	1	153年(1866~2018)	1	116年(1901~2016)	NOAA ESRL
	-	1	149年(1870~2018)	1	116年(1901~2016)	JAMSTEC

BMD: Bangladesh Meteorological Department, BWDB: Bangladesh Water Development Board,

IMD: Indian Meteorological Department, JAMSTEC: 国立研究開発法人海洋研究開発機構,

ESRL: Earth Systems Research Laboratory

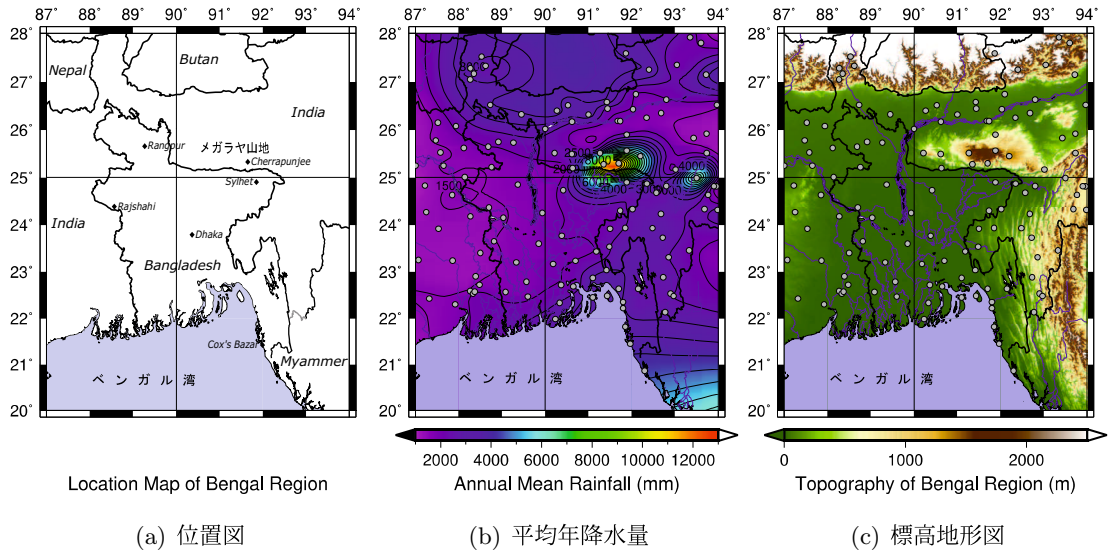


図 3.1 ベンガル地域の平均年降水量と標高地形図

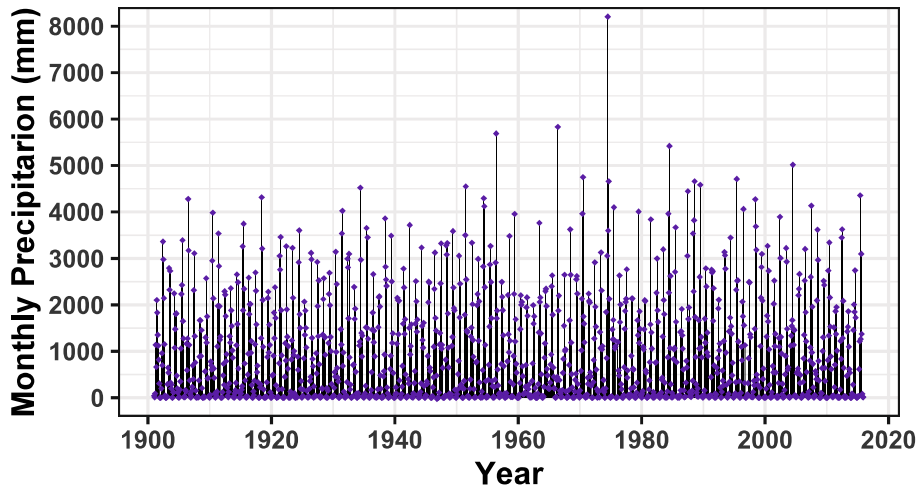


図 3.2 Cherrapunjee の月降水量 (1901～2015)

3.3.2 バングラデシュの降水量

ベンガル地域の各観測所において、30年間(1985～2014)の平均年降水量を算出し、コンターを描いたものを図 3.1(b) に示す。年間降水量の極大値を持った地域がメガラヤ山地中央部付近とマニプール州付近の2箇所に集中しており、図 3.1(c) の標高地形図と比較すると、南西からの夏季インドモンスーンが山地にぶつかって収束する箇所と一致している。ベンガル地域は世界最大級の豪雨地帯であり、特にメガラヤ山地の南側に位置する Cherrapunjee は、年間降水量(26,461mm, 1860年8月～1861年7月)の世界最高記録を持っている[58]。図 3.2 に Cherrapunjee (位置は図 3.1(a) を参照) の月降水量の推移を示す。雨季の月降水量は、概ね 3,000～4,000mm であるが、8,000mm を超える月を記録した年も見られる。メガラヤ山地の降水量の極大域は、山地の南側で発生しており、この降水による流出水が国境を越えて直下流のバングラデシュに流れ込んで洪水が頻発する。

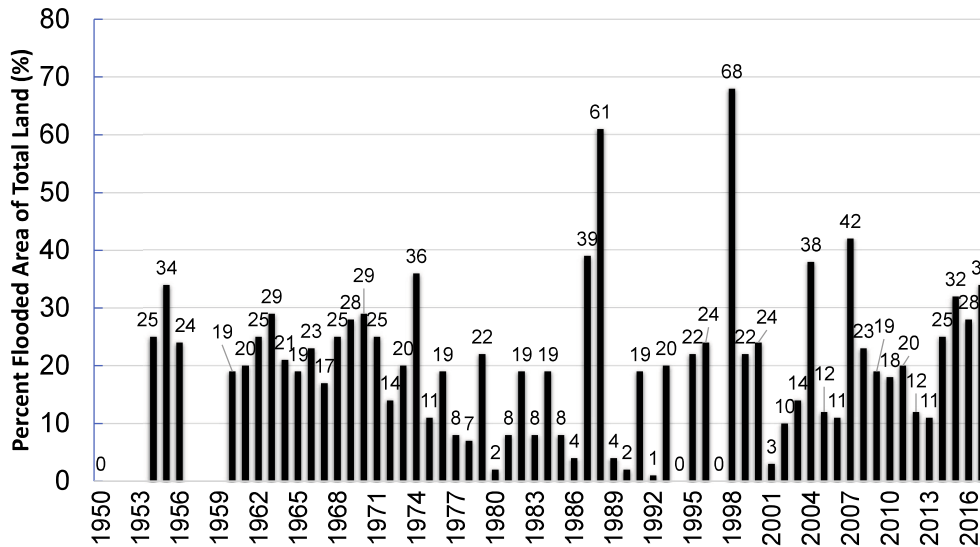


図 3.3 年毎の氾濫面積率（1950～2017）

一方、バングラデシュの年降水量は、メガラヤ山地に近い東北部 Sylhet と、ミャンマーとの国境を形成するアラカン山脈に近い南東部 Cox's Bazar 付近で約 4,000mm であるが、首都 Dhaka や Rangpur, Rajshahi など中央から西部にかけては、1,500mm から 2,000mm と比較的少ない。

3.3.3 バングラデシュの洪水

毎年の国土面積に対する氾濫面積率^[59]を図 3.3 に示す。特に、氾濫面積が国土の 30% を超えた年（1954, 1974, 1987, 1988, 1998, 2004, 2007, 2015, 2017）を大洪水の年としており、およそ 7 年程度の間隔で発生している。洪水被害は主に、(a) GBM の大規模氾濫、(b) インドとの国境から流入する支川のフラッシュ洪水による氾濫、(c) ハオールの氾濫（特殊な地域特性を有することによる被害）(d) 高潮による氾濫の 4 つに分類される^[60]。特に 1998 年には、Brahmaputra と Ganges の洪水がほぼ同時に生起し、国土の 68% が約 70 日間にもわたって浸水し「今世紀最悪の」と形容された大洪水が襲った。

メガラヤ山地の南側にあたるバングラデシュ北東部には、標高 3～5m のハオール (Haor) と呼ばれる広大な窪地が存在し、雨季にはインドからの流出水がこのハオールに一時的に貯留され、その湛水面積は約 8,600km² にも及んでいる^[61]。特に、乾季の終わりの 3 月下旬～4 月にかけて発生する季節外れの大雨によるフラッシュ洪水で、ハオールに作付けされた収穫前の米が全滅になる、といった大被害が近年しばしば報告されている^[62]。なお、ハオールは雨季に浸水することが通常状態であるため、図 3.3 の氾濫面積率には含まれていない。

1988, 1998, 2007, 2017 年における GBM 代表水位観測所とハオール (Haor) の位置を図 3.4 に、代表地点の水位変化を比較したものを図 3.5 に示す。1988 年と比較すると、Ganges

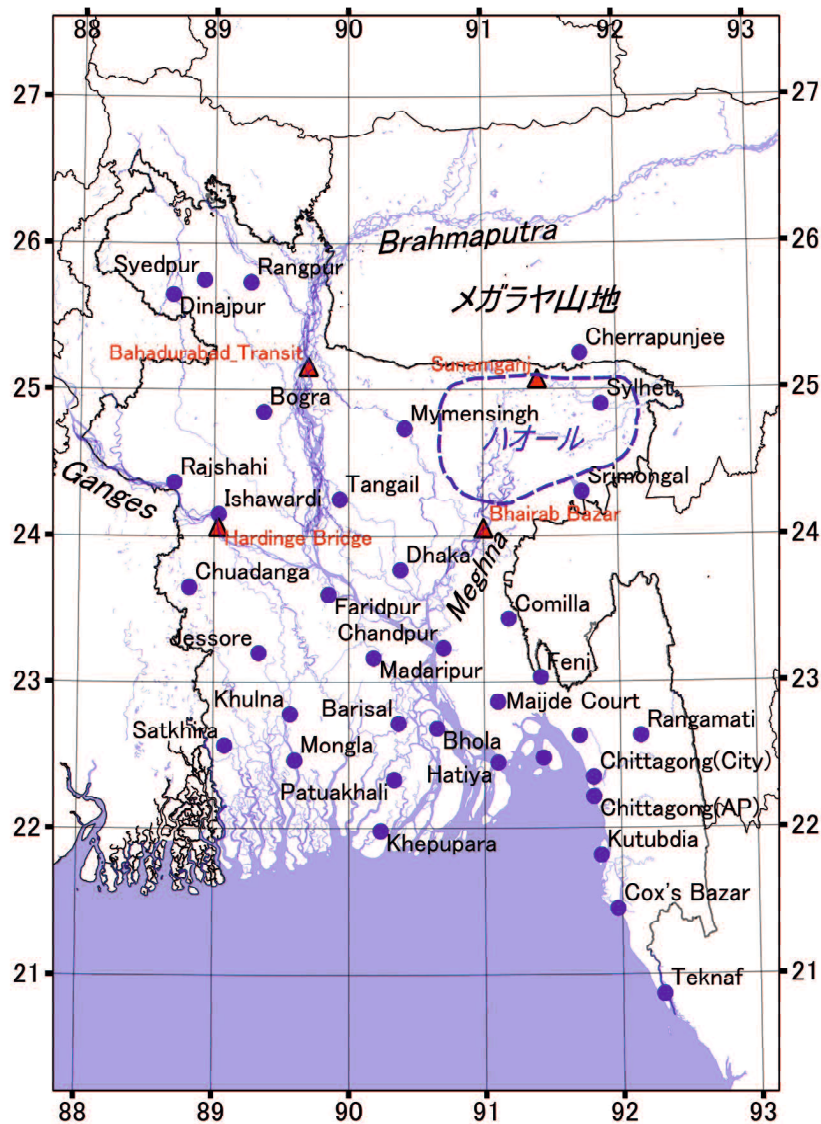
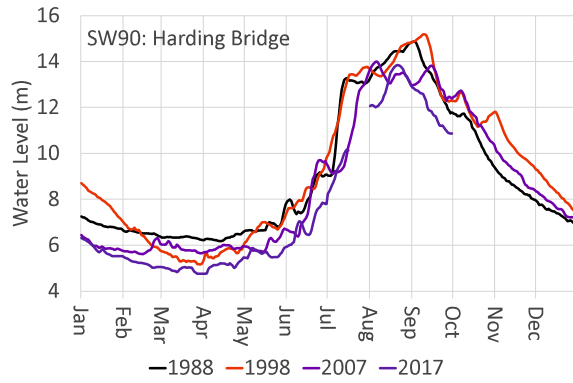
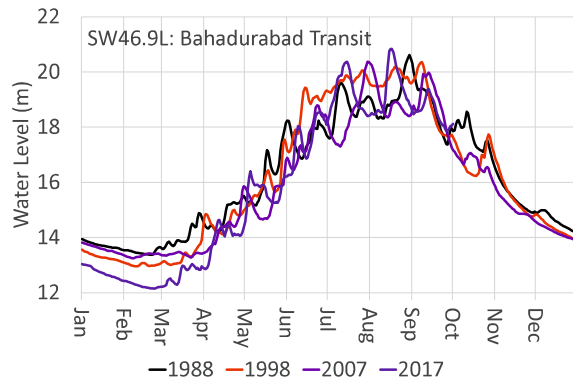


図 3.4 GBM 代表水位観測所とハオール (Haor) の位置

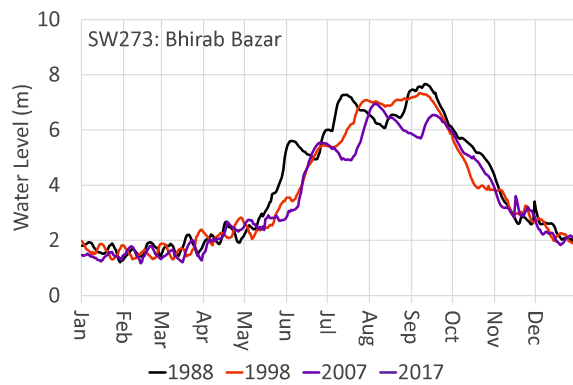
および Brahmaputra では、乾季の水位が低くなっている傾向が図 3.5(a) および (b) からみてとれる。これは気候変動により流域の降水量が減少している、あるいは、河床が低下している等、いくつかの理由が考えられる。図 3.5(c) の Meghna の水位観測所 SW273 地点は感潮区間に位置しており、乾季の水位はほとんど変化がないが、雨季は若干の減少傾向が見られる。一方、図 3.5(d) の Haor では 3 月下旬から 4 月にかけて水位が高くなる傾向が見られる。これは、Haor の直上流にあたるメガラヤ山地の南側で、気候変動の影響により、特に乾季の終わりに季節外れの大雨が増加したものと考えられる。



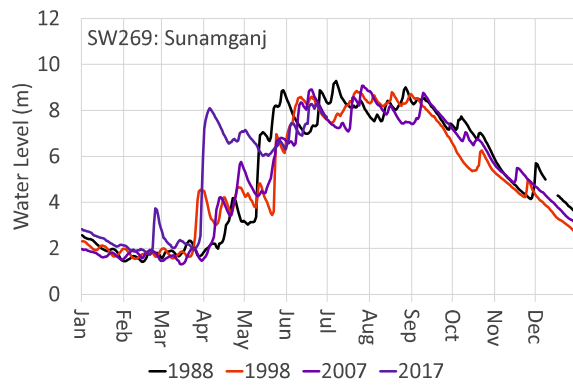
(a) Ganges



(b) Brahmaputra



(c) Meghna



(d) Haor

図 3.5 1988, 1998, 2007, 2017 年における GBM 代表観測所の水位変化

3.4 解析手法

3.4.1 データの前処理

ベンガル地域は明確な雨季と乾季が存在する。このため、降水量、河川水位・流量ともに、1年（12か月）の明確な周期性をもった時系列となり、気候変動規模の傾向を把握する場合、季節性を考慮した解析手法を適用、あるいは、フィルタリング等、何らかの前処理が必要となる。

時間方向に対するフィルタリング手法としては、移動平均法が一般的である。例えば、SOIの原系列に121ヶ月の移動平均を施すと、トレンドを求めることができる^[53]。さらに、原系列からトレンドを取り除き、残った時系列に対して13ヶ月移動平均を施すと、エルニーニョに特徴的な時間スケールの時系列を求めることができる。しかし、今回解析対象としたデータは32年間（384ヶ月）であるため、移動平均法では、前後120ヶ月分のデータが削除され144ヶ月分の時系列データとなり、解析に対して十分なデータ数を確保することができない。従って本研究では、局所的に重み付けされた散布図平滑化（Loess）をつかったフィルタリング手法であるSTL（Seasonal and Trend decomposition using Loess）^[45]を適用することとした。原系列 Y_t は、STLを使って以下の式で説明できる。

$$Y_t = S_t + T_t + R_t \quad (3.1)$$

ここで、 S_t は季節変動成分、 T_t はトレンド成分、 R_t は残差である。一例としてダッカの月降水量をSTL分解したものを図3.6に示す。図中の最上段が原時系列 Y_t 、二段目が季節変動成分 S_t 、三段目がトレンド成分 T_t 、下段が残差成分 R_t である。

本研究では、原系列 Y_t に加えて、 S_t と R_t を除去したトレンド T_t についても解析対象とし、原系列で解析した場合と比較した。

なお、観測データの異常値および欠測については、近隣の観測所のデータで補完した。また、月単位の欠測についてはカルマン平滑化モデル^[63]を用いて補完した。

3.4.2 長期変化傾向の分析

(1) Mann-Kendall 検定

インドのCherrapunjee地点およびバングラデシュの35地点を併せた計36箇所の観測所の月降水量、および3箇所の河川水位に対しMann-Kendall検定（以下MK検定とする）^[47]を適用した。

MK検定は、ノンパラメトリックな手法の一つであり、トレンドが線形か非線形かにかかわらずトレンドを検出できる手法で、欠測や外れ値の影響を受けにくいという特徴がある。具体的には、サンプル数 N の時系列において、 i 番目の値より大きい値が i 番目の後ろにい

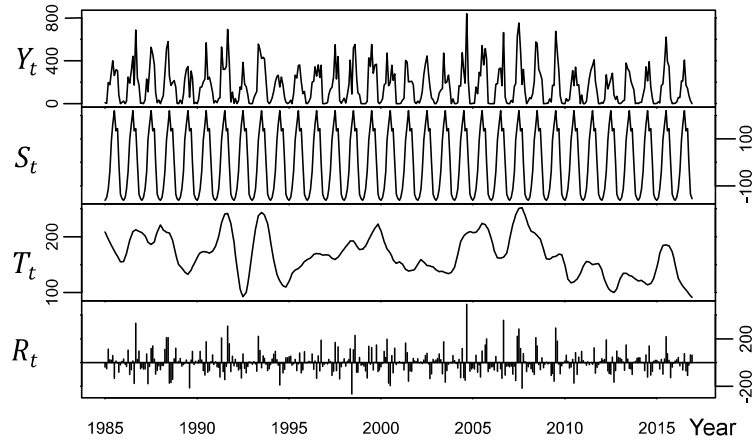


図 3.6 ダッカの月降水量の STL 分解

くつあるかを示した統計量 S を計算する. 独立で同一の確率分布に従うという帰無仮説 H_0 と同一の確率分布に従わないという対立仮説 H_1 をたて, 統計量 S を基準化した標準統計量 Z を計算して, 帰無仮説が採択できるかを判定し, 統計的有意性を検定する. このとき, トレンドの傾きを表す Sen's Slope が計算できる. MK 検定の詳細を以下に説明する.

ランダムで独立な n 個の観測値が X_1, X_2, \dots, X_n であるとき, 以下の統計量 S を求める.

$$S_n = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(X_j - X_k) \quad (3.2)$$

ここで

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x > 0 \\ 0 & \text{if } x = 0 \\ -1 & \text{if } x < 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

統計量 S の分散は, 式 (3.4) で求められる.

$$\sigma = \frac{\{n(n-1)(2n+5) - \sum_{j=1}^p t_j(t_j-1)(2t_j+5)\}}{18} \quad (3.4)$$

これらから, 式 (3.5) により S を基準化した標準統計量 Z を算定する.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sigma} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sigma} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

ここで, 有意水準を α とした時, 標準正規変量 Z が $|Z| \leq Z_{\alpha/2}$ (ただし, $\Phi(Z_{\alpha/2}) = \alpha/2$, $\Phi(\cdot)$: 標準正規分布) を満たすとき, 帰無仮説 H_0 は採択される. また, $S > 0$ のと

き、時系列 X_n は有意な増加傾向がある、 $S < 0$ のとき、有意な減少傾向があることを示している。またこのとき、傾向変動の傾きに相当する Sen's Slope が式 (3.6) で計算できる。

$$\beta = \text{median} \frac{x_i - x_j}{i - j}, \quad j < i, \quad 1 < j < i < n \quad (3.6)$$

ここで median は中央値を算出する関数を表す。

(2) Seasonal Mann-Kendall 検定

Seasonal Mann-Kendall 検定（以下 SMK 検定とする）^[49] では、時系列の季節性を考慮に入れる。これは 12 ヶ月の季節性を持つ月次データについて、時系列全体で傾向があるかどうかを見つけようとするのではなく、その月毎に傾向があるかどうかを判定する手法である。

最初に各月についてすべての S_g を式 (3.7) で計算し、そして平均の \hat{S} を式 (3.8) で計算する。系列が独立である（すなわち、1月の値と2月の値は独立である）こと、または従属であることを仮定して、統計量の分散が計算できる。

$$S_g = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(X_{jg} - X_{ig}), \quad g = 1, 2, 3, \dots, m \quad (3.7)$$

$$\hat{S} = \sum_{g=1}^m S_g \quad (3.8)$$

MK 検定と同様に 36 箇所の観測所の月降水量および 3 箇所の河川水位に対し SMK 検定を行い、月毎の変化傾向について有意水準 1% と 5% で判定した。さらに Seasonal Sen's Slope を計算し MK 検定の結果と比較した。

なお、解析手法には、オープンソース・フリーソフトウェアでライブラリが充実している統計解析向けのプログラミング言語 R^[64] を用いた。

3.5 解析結果と考察

3.5.1 トレンド解析の進め方

最初に地点毎の観測データを有しているバングラデシュとインド Cherrapunjee 地点の解析を行い、変化傾向を分析する。次にインドの地域毎に統計処理されたデータを解析し、バングラデシュの結果と比較することにより、本研究の目的であるベンガル地域全体の降水量変化傾向を解明することとした。

3.5.2 ベンガル地域の降水量変化傾向

(1) バングラデシュの月降水量 32 年間

インドの 1 地点、バングラデシュの 35 地点における 1985 年から 2016 年の 32 年間の月降水量について MK 検定, SMK 検定, および月降水量の季節変動を除去したトレンドについて MK 検定で解析した。その結果は表 3.2 に示している。有意な傾向があるとはいえない地点を N, 5%水準で有意ならば*, 1%水準に対しては**と表示した。

原系列, すなわち月降水量の時系列データの MK 検定結果は, すべての地点において有意な変化傾向が検出できなかった。これは, 原系列が 12 か月の周期変動を含んでいるため, MK 検定では有意な変化傾向を十分に検出できないということが示唆される。ただし, 統計量 S についてみると, Sandwip を除く全ての地点において $S < 0$ となり, 有意ではないが減少傾向という結果が得られた。一方で SMK 検定の結果は, 36 地点中, 11 地点が有意な減少傾向となり, うち 7 地点は 1%水準で有意との結果が得られた。有意な変化のあった地点で Sen's Slope を計算し, 図 3.7(a) にシンボルの大きさを示した。

▽が有意な減少傾向, △が有意な増加傾向がみられる地点を示している。なお, ○は有意な傾向がみられず Sen's Slope の値は 0 である。Sen's Slope は, Dhaka, Madaripur, Tangail, Bogra, Sylhet 地点およびインドの Cherrapunjee 地点で, -0.1 を超える値となっておりバングラデシュ中部から北西部にかけての地域と年間降水量が 4,000mm を超える北東部のメガラヤ山地とそれに近い地域で, 月降水量の顕著な減少傾向が認められる。特に, 世界最大級の豪雨地帯にある Cherrapunjee 地点の Sen's Slope の値は-0.56 で他地点に比べて絶対値が大きく, 豪雨地帯ほど変化が大きくなっていることが分かる。

月降水量の原系列に対する MK 検定では時系列全体での有意な変化傾向を十分に検出できなかったことから, 季節変動を STL で除去し, 平滑化した時系列に対し MK 検定を行うこととした。その結果を表 3.2 の右列に, 変化傾向の分布を図 3.7(b) に示す。全 36 地点中 23 地点で有意な減少傾向, そのうち 21 地点が 1%水準で有意との結果が得られた。また, 7 地点では有意な増加傾向となり, そのうち 5 地点が 1%水準で有意となっている。図 3.7(a) と (b) を比較すると, SMK 検定で有意な減少傾向があると分析された地点に加えて, STL 分解で抽出した時系列の MK 検定では, より感度良く変化傾向を検出できている。さらに SMK 検定では検出できなかった南部から南東部での増加傾向もとらえることができた。特に, バングラデシュ北西部 (Bogra, Dinajipur, Ishurudi, Rajshahi Rangpur, Syedpur) での結果は, Nury and Hasan^[65] が実施した MK 検定, SMK 検定の解析結果とほぼ一致している。

以上の結果から, バングラデシュにおける 32 年間の月降水量は中部～北部地域で減少傾向を示し, 特に中部において有意である。一方, 南部～南東部では変化はあまり認められないが一部上昇傾向であることがわかった。

表 3.2 バングラデシュ 35 観測所, インド 1 観測所における月降水量の変化傾向 (1985 ~ 2016)

Station	MK-Test (原系列)				有意な傾向	SMK-Test (原系列)				有意な傾向	MK-Test (STL)			
	有意な傾向	Sens.Slope	S	Z		有意な傾向	S.Sens.Slope	S	Z		有意な傾向	Sens.Slope	S	Z
1 Dhaka	N	-0.0294	-3809	-1.52	** (-)	-0.250	-705	-3.35	** (-)	-0.126	-17856	-7.10		
2 Tangail	N	-0.0278	-3331	-1.46	** (-)	-0.300	-688	-3.61	** (-)	-0.0888	-15210	-6.67		
3 Mymensingh	N	-0.0136	-2991	-1.19	** (-)	-0.0851	-580	-2.77	** (-)	-0.135	-18964	-7.55		
4 Faridpur	N	-0.0187	-3496	-1.39	* (-)	-0.0909	-499	-2.37	** (-)	-0.0886	-19658	-7.82		
5 Madaripur	N	-0.0164	-2865	-1.14	** (-)	-0.150	-599	-2.86	** (-)	-0.126	-23086	-9.19		
6 Srimangal	N	0	-414	-0.165	N	0	-172	-0.814	* (+)	0.0334	5278	-0.165		
7 Sylhet	N	-0.0139	-1993	-0.793	* (-)	-0.154	-518	-2.45	** (-)	-0.115	-11734	-4.67		
8 Bogra	N	-0.0109	-3655	-1.46	** (-)	-0.125	-669	-3.19	** (-)	-0.142	-24014	-9.55		
9 Dinajpur	N	0	-2054	-0.820	* (-)	0	-417	-2.00	** (-)	-0.111	-18984	-7.55		
10 Ishwardi	N	0	-1217	-0.485	N	0	-316	-1.50	** (-)	-0.0469	-10528	-4.19		
11 Rajshahi	N	0	-1837	-0.732	N	0	-321	-1.53	** (-)	-0.0519	-14554	-5.79		
12 Rangpur	N	-0.00641	-2582	-1.03	* (-)	-0.0714	-520	-2.48	** (-)	-0.108	-17612	-7.01		
13 Syedpur	N	0	-563	-0.247	N	0	-175	-0.917	** (-)	-0.129	-15348	-6.73		
14 Chuadanga	N	0	-1231	-0.540	N	0	-293	-1.53	** (-)	-0.0569	-11170	-4.90		
15 Jessore	N	0	-1570	-0.625	N	0	-267	-1.26	** (-)	-0.0362	-6622	-2.63		
16 Khulna	N	0	-26	-0.00996	N	0	-87	-0.410	** (+)	0.0491	9784	3.89		
17 Mongla	N	0	-126	-0.0549	N	0	-139	-0.726	N	-0.0255	-4078	-1.79		
18 Satkhira	N	0	-1515	-0.604	N	0	-367	-1.75	** (-)	-0.0376	-8630	-3.43		
19 Barisal	N	-0.00324	-1748	-0.696	N	0	-325	-1.55	** (-)	-0.0361	-6584	-2.62		
20 Bhola	N	0	-1793	-0.714	N	0	-358	-1.70	** (-)	-0.0486	-7974	-3.17		
21 Khepupara	N	0	-1051	-0.419	N	0	-209	-0.991	N	0.00346	624	0.248		
22 Patuakhali	N	0	-1561	-0.622	N	0	-363	-1.72	* (-)	-0.0285	-5624	-2.24		
23 Chandpur	N	0	-716	-0.285	N	0	-111	-0.526	N	0.0207	3212	1.28		
24 Teknaf	N	0	-28	-0.0108	N	0	47	0.225	** (+)	0.106	14576	5.80		
25 Chittagong(AP)	N	0	-1698	-0.677	N	0	-382	-1.83	N	0.0307	3522	1.40		
26 Comilla	N	-0.00474	-1840	-0.733	N	0	-294	-1.40	* (-)	-0.0313	-5924	-2.36		
27 Cox's Bazar	N	0	-1811	-0.722	N	0	-384	-1.83	N	0.0104	1128	0.448		
28 Feni	N	-0.00840	-2543	-1.01	** (-)	-0.0909	-592	-2.83	** (-)	-0.0865	-11008	-4.38		
29 Hatiya	N	0	1201	0.479	N	0	139	0.661	** (+)	0.168	21816	8.68		
30 Kutubdia	N	0	-318	-0.127	N	0	1	0	* (+)	0.0524	5708	2.27		
31 Maijide Court	N	0	-1018	-0.405	N	0	-275	-1.31	** (-)	-0.0285	-5464	-2.17		
32 Rangamati	N	-0.00599	-1873	-0.746	N	0	-360	-1.71	** (-)	-0.0853	-9830	-3.91		
33 Sandwip	N	0	77	0.0303	N	0	-25	-0.116	** (+)	0.153	16056	6.39		
34 Chittagong(City)	N	0	-302	-0.132	N	0	-132	-0.690	** (+)	0.102	11178	4.90		
35 Sitakunda	N	0	-1502	-0.598	N	0	-317	-1.51	N	0.0173	1812	0.721		
36 Cherrapunjee	N	-0.0580	-2402	-1.00	** (-)	-0.560	-567	-2.79	** (-)	-0.452	-12638	-5.27		

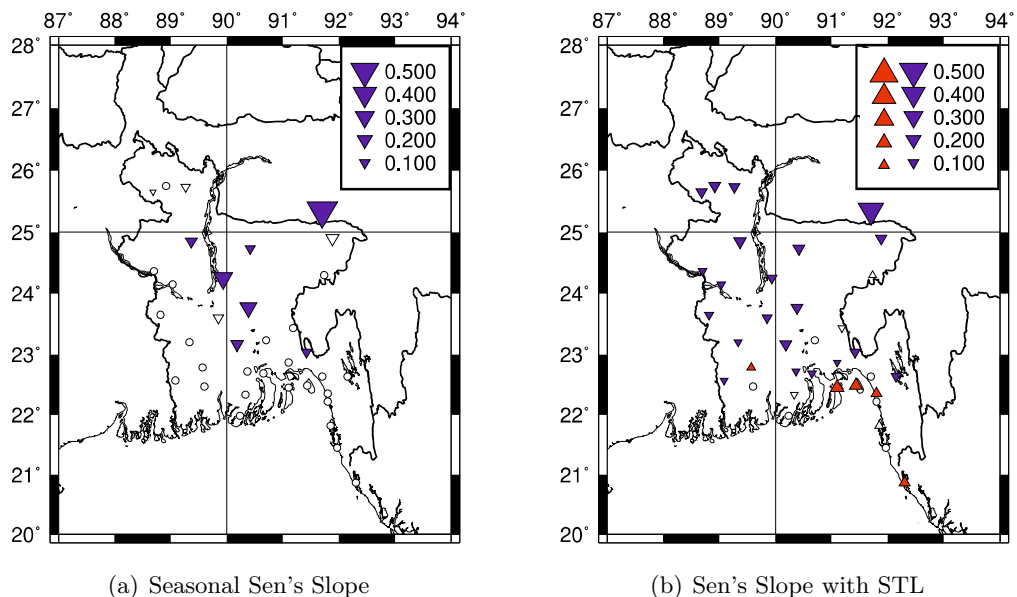


図 3.7 有意なトレンドを有する地点と Sen's Slope の分布 (※凡例の大小は Sen's Slope の大きさを表している)

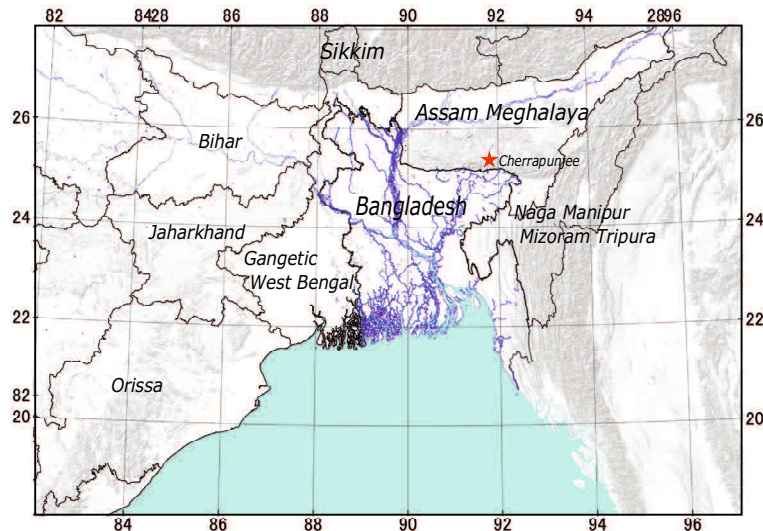


図 3.8 インド東北部7地域位置図

(2) バングラデシュ周辺の月降水量 32 年間

この項ではバングラデシュ周辺の月降水量の変化傾向の分析結果について述べる。インドにおける観測所単位のデータは入手できなかったため、インド熱帯気象研究所 (Indian Institute of Tropical Meteorology) [44] が取りまとめた 27 地域の州毎の平均月降水量のうち、バングラデシュ周辺の図 3.8 に示す 7 地域の州を選び、同様に分析した。分析対象期間は同様に 1985 年から 2016 年の 32 年間とし、原系列に対して MK 検定, SMK 検定, STL を使って求めた時系列に対して MK 検定を行った。表 3.3 に示すとおり、バングラデシュの結果とほぼ同様の結果が得られた。原系列については、7 地域とも有意な変化があるとは言えないが、Sen's Slope はすべて負の値であり、減少傾向である。この結果は、Lairenjam ら [55] が実施した MK 検定の結果と一致している。SMK 検定については、7 地域中 3 地域が有意な減少傾向で、うち Assam Meghalaya と Naga Manipur Mizoram Tripura の 2 地域が 1%水準で有意な減少傾向となった。STL 分解で抽出した時系列の MK 検定では、5 地域が 1%水準で有意な減少傾向となった。すべての分析結果で Sen's Slope は負の値であり、バングラデシュ周辺地域の 32 年間の降水量は、南東部に国境を接するミャンマーを除いて減少傾向であることが示された。メガラヤ山地などの世界最大級の豪雨地帯の周辺は有意な減少傾向で、その傾きの絶対値はバングラデシュのそれよりも大きいことがわかる。

(3) 月降水量 116 年間

インドの Cherrapunjee 地点および 7 地域の月降水量は、バングラデシュのデータ期間 (1985 ~ 2016) に合わせて 32 年間のデータで解析を行ったが、実際は 116 年間のデータが存在しており、より長い期間での分析が可能である。116 年間の分析結果と比較することで、32 年間で有意な減少傾向という現象が、この期間に特化したものであるのか、もしくは、一連の減少傾向のうち一部の現象であるのかが推測できる。32 年間のデータと同様に

表 3.3 インド 7 地域の平均月降水量の変化傾向（1985 ～ 2016）

State	MK-Test (原系列)				SMK-Test (原系列)				MK-Test (STL)			
	有意な傾向	Sens.Slope	S	Z	有意な傾向	S.Sens.Slope	S	Z	有意な傾向	Sens.Slope	S	Z
1 Assam Megaraya	N	-0.0492	-3316	-1.32	** (-)	-0.462	-673	-3.15	** (-)	-0.0927	-21558	-8.58
2 Naga Manipur Mizoram Tripura	N	-0.0431	-3699	-1.47	** (-)	-0.423	-762	-3.57	** (-)	-0.103	-23780	-9.50
3 Sikkim	N	-0.0113	-1687	-0.671	N	-0.121	-371	-1.73	** (-)	-0.0946	-23810	-9.47
4 Gangetic West Bengal	N	-0.0154	-2168	-0.862	* (-)	-0.200	-499	-2.34	** (-)	-0.0360	-11198	-4.46
5 Orissa	N	-0.00375	-950	-0.378	N	-0.0300	-183	-0.855	N	-0.00400	-1166	-0.464
6 Jharkhand	N	-0.00275	-962	-0.382	N	-0.0350	-231	-1.08	N	-0.0132	-4324	-1.72
7 Bihar	N	-0.00301	-1527	-0.607	N	-0.0575	-367	-1.72	** (-)	-0.0550	-18410	-7.33
36 Cherrapunjee	N	-0.0580	-2402	-1.00	** (-)	-0.560	-567	-2.79	** (-)	-0.452	-12638	-5.27

表 3.4 インド 7 地域と 1 地点の平均月降水量の変化傾向（1901 ～ 2016）

State	MK-Test (原系列)				SMK-Test (原系列)				MK-Test (STL)			
	有意な傾向	Sens.Slope	S	Z	有意な傾向	S.Sens.Slope	S	Z	有意な傾向	Sens.Slope	S	Z
1 Assam Megaraya	N	-0.00525	-17015	-0.982	** (-)	-0.0538	-3959	-2.73	** (-)	-0.0124	-153988	-8.89
2 Naga Manipur Mizoram Tripura	N	-0.00601	-24393	-1.41	** (-)	-0.0626	-5613	-3.87	** (-)	-0.0141	-184110	-10.6
3 Sikkim	N	0	535	0.0308	N	0	-202	-0.139	** (-)	-0.00975	-100798	-5.82
4 Gangetic West Bengal	N	0.000373	7198	0.416	N	0	1303	0.901	** (+)	0.00484	68718	3.97
5 Orissa	N	-0.000183	-5490	-0.317	N	0	-1248	-0.861	** (-)	-0.00414	-70080	-4.05
6 Jharkhand	N	-0.000472	-9153	-0.528	N	-0.00370	-2227	-1.54	** (-)	-0.00650	-101228	-5.84
7 Bihar	N	0	6268	0.362	N	0	1014	0.703	** (-)	-0.00412	-63880	-3.69
36 Cherrapunjee	N	0.000916	7800	0.450	N	0	1617	1.12	** (+)	0.0626	94170	5.44

分析した結果を表 3.4 に示す。原系列に対する MK 検定では、すべての地域で有意な変化がみられなかったが、Assam Meghalaya と Naga Manipur Mizoram Tripura の 2 地域は、原系列に対する SMK 検定と STL 分解で抽出した時系列に対する MK 検定において、1%水準で有意な減少傾向となった。また、STL 分解で抽出した時系列に対する MK 検定では、すべての地域で有意な変化が検出された。Sen's Slope の値は、Gangetic West Bengal 地域と Cherrapunjee 地点を除いて、0 か負の値を示しており、バングラデシュ周辺地域の降水量は 116 年間でも減少傾向であることを示すことができた。

(4) 116 年間と 32 年間のトレンド比較

116 年間と 32 年間の変化傾向分析結果の地域別の比較を表 3.5 に示す。各地域の N は有意な変化無し、値があるものは有意な変化があることを示している。特にバングラデシュ北東に位置する Assam Meghalaya, Naga Manipur Mizoram Tripura 地域と Cherrapunjee 地点では有意な減少傾向がみられ、近年 32 年間のほうが 116 年間よりも減少の割合が大きい。Assam Meghalaya, Naga Manipur Mizoram Tripura の 2 地域の Sen's Slope の絶対値は、116 年間（1901 ～ 2016）に対して 32 年間（1985 ～ 2016）で 6.75 ～ 9.06 倍大きい。これは、この 2 地域で近年 32 年間の月降水量の減少の割合が以前に比べて増加していることを意味する。Cherrapunjee 地点については、116 年間でみると増加傾向であるものの、近年 32 年間では減少傾向に転じている。

データの存在している最大の期間（1871 ～ 2016）を約 30 年毎に分割し、それぞれの期間で SMK 検定、STL をつかって求めたトレンド時系列の MK 検定を行い Sen's Slope を計

表 3.5 116 年間と 32 年間の変化傾向分析結果の地域別の比較

Area	Method	1901~2016 Sen's Slope	1985~2016 Sen's Slope	Ratio
Assam Meghalaya	SMK	-0.0538	-0.462	8.57
	MK+STL	-0.0124	-0.0927	7.45
Naga Manipur Mizoram Tripura	SMK	-0.0626	-0.423	6.75
	MK+STL	-0.0114	-0.103	9.06
Sikkim	SMK	N	N	N/A
	MK+STL	-0.00975	-0.0946	9.70
Gangetic West Bengal	SMK	N	-0.200	N/A
	MK+STL	0.00484	-0.0360	7.43
Bihar	SMK	N	N	N/A
	MK+STL	-0.00412	-0.0550	13.3
Jarkhand	SMK	N	N	N/A
	MK+STL	-0.00650	-0.0132	2.04
Orissa	SMK	N	N	N/A
	MK+STL	-0.00400	N	N/A
Cherrapunjee	SMK	N	-0.560	N/A
	MK+STL	0.0626	-0.452	7.22

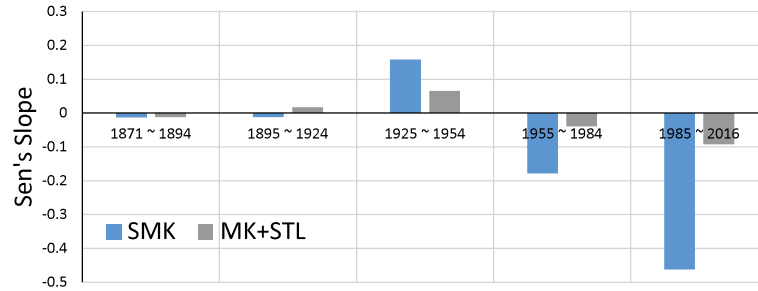
算したところ、図 3.9 に示すように、2 地域 1 地点とも 1955 年ごろまでは有意な変化がなく、一方で近年 32 年間で最も減少の割合が大きく、またその変化傾向は有意であることがわかった。

これらのことから、原系列そのものに 12 ヶ月（1 年）周期変動以外の時間的な変動の存在が推測される。また、この時間的な変動はエルニーニョやインド洋ダイポールモードなど、気候変動規模の現象となんらかの関係があることも考えられる。これらについては、第 4 章で述べる。

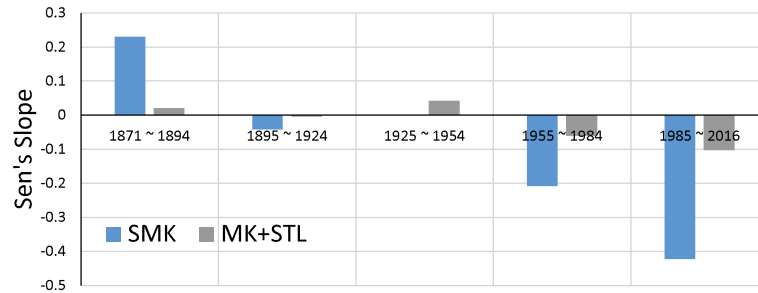
3.5.3 極端現象のトレンド

(1) 日降水量の閾値超過回数の変化傾向

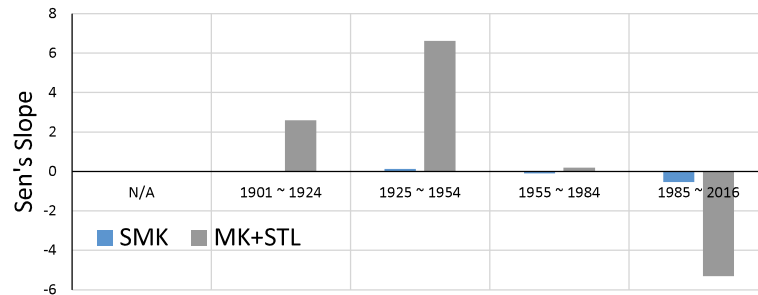
近年、水災害の激甚化、極端な気象現象の顕在化が指摘されている状況において、 Bangladesh の降水量は概ね全域で減少傾向であるとの結果が得られた。ここでは、極端現象のトレンドについて定量的に把握するために、日降水量の閾値超過回数の変化傾向について分析した。極端現象のトレンド分析は、一般的に分析期間を 2 つ以上に分割し、各期間毎に閾値超過回数の平均を求め、比較する方法^[66]がある。年間に数回発生するような現象で、数年に一度発生するような稀な現象でない場合は、MK 検定を適用することができる^[67]。本研究では、Bangladesh の全 35 地点（Case 1）、有意な減少傾向のあった 23 地点（Case



(a) Assam Meghalaya



(b) Naga Manipur Mizoram Tripura



(c) Cherrapunjee

図 3.9 期毎に区切った場合の Sen's Slope の比較

2), 有意な増加傾向のあった7地点 (Case 3) の日降水量について, それぞれ無降雨日数と, 日降水量の閾値を 1mm ~ 400mm で 10mm おきに設定したときの超過回数を 10 地点あたりに正規化し, 32 年間 (1985 ~ 2016) の時系列を求めた. 3 ケースの時系列について MK 検定を実施し, Sen's Slope の値をプロットした. 結果を図 3.10 に示す.

赤色プロットは 5%水準で有意な傾向が検出された系列である. 例えば, 80mm/日を閾値としたときの超過回数の年変化は, 月降水量が有意な減少傾向の 23 地点 (Case 2) で, 有意な減少傾向を示すことを意味する. Case 1 と Case 2 では, 無降雨の日数が有意とはいえないが増加傾向であり, その傾きを示す Sen's Slope も 2.4 ~ 2.5 と大きい. Case 1 では, 1mm/日以上降雨日数は有意とはいえないが減少傾向であり, その傾向は閾値を 140mm/日としたあたりまで傾きが小さくなっているものの, 減少傾向である. 150mm/日以上を閾値とした場合は, 変化は見られない. Case 2 も Case 1 と同様であるが, 閾値 80mm/日から 240mm/日の間において, 5%水準で有意な減少となった. これらの結果から, バングラ

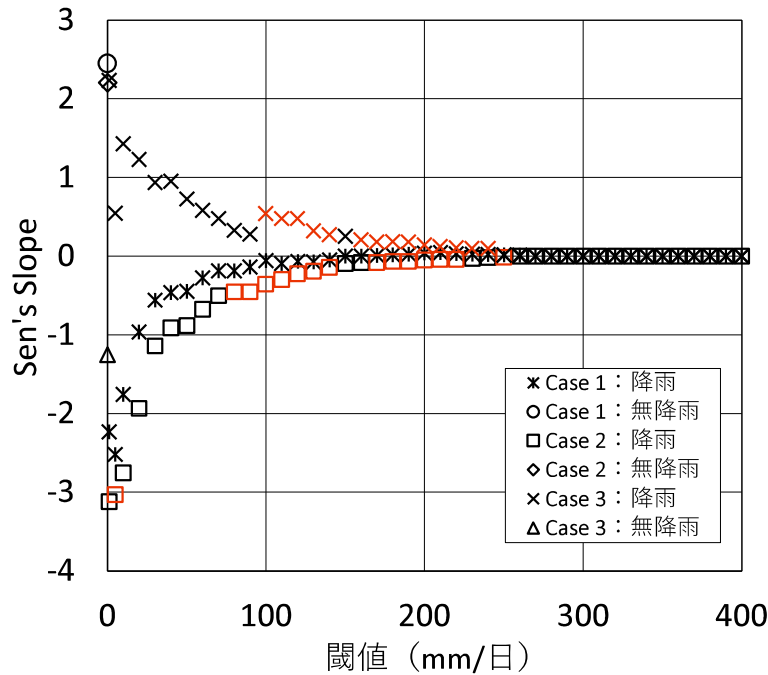


図 3.10 閾値と超過回数変化の傾きとの関係

デシュでは無降雨の日数が増加しており、日に 1mm から 80mm 程度の災害が発生しないような通常の雨の降り方が減少、特に月降水量が有意な減少となった地点では、通常の雨の降り方が有意に減少していることがわかる。

一方で Case 3 は、Case 1, 2 とは逆の結果が得られた。月降水量が有意な増加となった地点では、無降雨の日数が減少しており、日に 1mm から 100mm 程度の災害が発生しないような雨の日数も増加、さらに、日に 100mm から 240mm の災害を発生させるような雨の降り方も有意に増加している。我が国等で近年しばしば「雨の降り方が変わってきた」と指摘されているが、バングラデシュの結果も同傾向である。

2014 年の IPCC(気候変動に関する政府間パネル) 第 5 次報告書 (IPCC, 2014)^[68] は、20 世紀の間に、降水量が増加している地域では統計的に有意な水準で激しい降水の頻度が増え、降水量が減少している地域では強い降水が減少したことを指摘している。この特徴は、アメリカ合衆国^{[69][70][71]} や日本^{[72][73]} などの観測データで確認されていたが、バングラデシュの観測データでも同じ現象を確認できたことになる。

(2) 河川水位の変化傾向

河川流量は、基本的に降水量の変動に応答する時系列となる。入手した観測データは一日一回の観測水位と月一回の観測流量で、日流量の時系列を求めるには水位流量曲線式が必要となる。しかし、公式の水位流量曲線式を入手できなかったこと、バングラデシュの洪水災害は越水、溢水、堤防決壊によるものがほとんどであることから、本研究では水位データで分析・評価することとした。日本の河川管理で用いられている流況(豊平低渇)の考え方^[74]

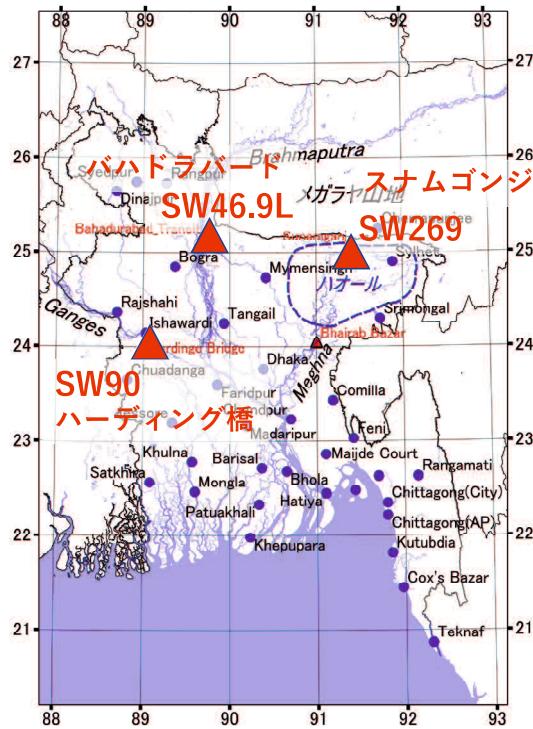


図 3.11 GBM と Haor 代表水位観測所の位置

を適用し、それぞれの水位について 30 年間（1987～2016）の変化傾向を降水量と同様の手法で分析した。分析対象は、GBM と Haor それぞれの代表水位観測所（SW90, SW46.9L, SW269）の 3 地点とした。3 地点の位置は図 3.11 に、結果を表 3.6 と表 3.7 に示す。

三大河川 GBM 代表水位観測所の水位変化傾向は、原系列、STL 分解で抽出したトレンド系列ともに 1%水準で有意な減少傾向となった。Sen's Slope の絶対値に着目すると、特に SW46.9L の Brahmaputra での減少の割合が Ganges, Meghna に比べて大きいことがわかる。Brahmaputra の中流部には世界最大級の豪雨地帯の Assam Meghalaya 地域が存在しており、3.5.2(2) の降水量の分析結果と一致している。流況の変化傾向を見ても同様に、SW46.9L で最高水位、豊水位を除いて 1%水準で有意な減少傾向となった。

図 3.12 に SW46.9L の流況について経年変化を示す。グラフの青色ラインは 1%水準で有意な減少傾向となった系列である。最高水位は若干上昇傾向であるようにみとれるが、MK 検定の結果では Sen's Slope の値が正となったものの有意とはいえない結果となった。また、特に、2010 年以降で、洪水時と低水時、つまり雨季と乾季の水位差が大きくなってきていることがわかる。このことも 3.5.3(1) の分析結果と一致している。ちなみに最新の情報では、2017 年 8 月 17 日に観測史上最高水位の 20.84m を記録している。ただし流量は観測史上最高の値ではなかった。このことは Brahmaputra の河道断面が縮小していること、あるいは河床が上昇していること等が考えられる。このような状況下で平水位以下の水位が有意に減少していることは、流量も有意に減少していると言える。

本研究では水位のみで評価したが、今後は流量での評価を行うことが求められる。

表 3.6 GBM と Haor 代表水位観測所の水位変化（1987～2016）Sens'Slope の値

Station No.	Period	MK	SMK	MK(trend)
SW90	1987-2016	$-1.752 \times 10^{-5} (**)$	$-8.375 \times 10^{-3} (**)$	$-3.696 \times 10^{-5} (**)$
SW46.9L	1987-2016	$-6.190 \times 10^{-5} (**)$	$-2.720 \times 10^{-2} (**)$	$-7.002 \times 10^{-5} (**)$
SW269	1987-2016	$-2.631 \times 10^{-5} (**)$	$-1.024 \times 10^{-2} (**)$	$-4.324 \times 10^{-5} (**)$

(**): 1%水準で有意, (*): 5%水準で有意, (N): 有意とはいえない

SW90: Harding Bridge@Ganges, SW46.9: Bahadurabad Transit@Brahmaputra

SW269: Sunamganj@Megna

表 3.7 GBM と Haor 代表水位観測所の水位変化（1987～2016）傾向

Station No.	Period	最高	豊水	平水	低水	渇水	最低
SW90	1987-2016	N	N	N	N	N	N
SW46.9L	1987-2016	N	N	**(-)	**(-)	**(-)	**(-)
SW269	1987-2016	N	**(-)	N	N	N	N

**(-): 1%水準で有意な減少, *(-): 5%水準で有意な減少

(N): 有意とはいえない

**(+): 1%水準で有意な増加, *(+): 5%水準で有意な増加

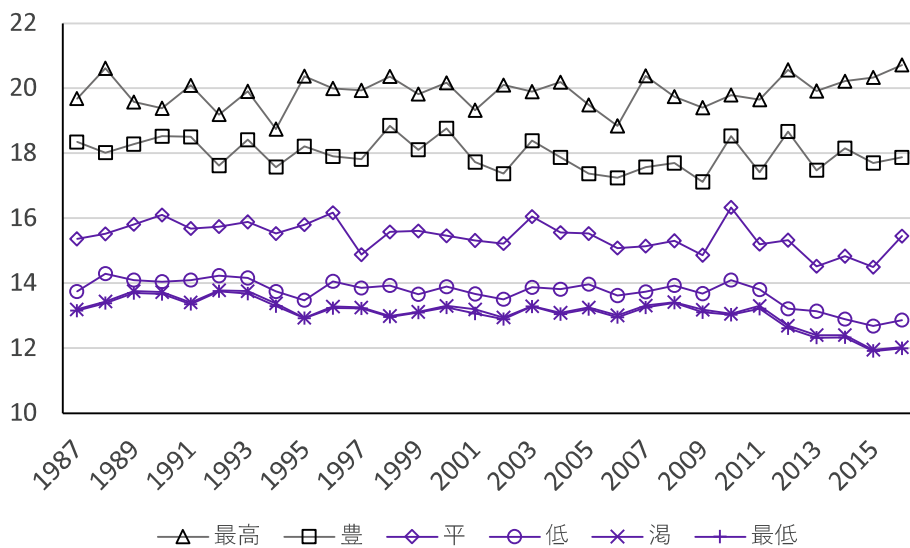


図 3.12 SW46.9L Bahadurabad Transit の毎年水位変化

3.6 本章のまとめ

本章では、ベンガル地域の水文データと気候変動指数を用いて、その長期間変動について MK 検定, SMK 検定, STL 分解と MK 検定を組み合わせた手法等で分析した。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 周期変動を有する時系列データの有意水準の判定には、STL をつかうことが有効である。
- 2) バングラデシュにおける 32 年間の月降水量は、中部～北部地域で減少傾向で、特に中部において有意である。また、南部～南東部で変化無し、または上昇傾向である。
- 3) 降水量が増加している地域では統計的に有意な水準で激しい降水の頻度が増え、降水量が減少している地域では強い降水が減少していることを、バングラデシュの観測データで確認し、「雨の降り方が変わってきた」ことを定量的に明らかにすることができた。
- 4) ベンガル地域の降水量は、116 年間で有意な減少傾向であるが、近年 32 年間のほうがその変化の傾きが大きい。
- 5) 三大河川の水位は 30 年間で有意な減少傾向である。特に Brahmaputra の減少の割合が大きい。特に 2010 年以降で低水位以下の水位減少が顕著である。

参考文献

- [42] Bangladesh Meteorological Department: Meteorological Observation Dataset from 1985 to 2016, Bangladesh Meteorological Department, 2016.
- [43] Bangladesh Water Development Board: Hydrometeoro-logical Dataset from 1987 to 2017, Flood Forecasting Warning Center of BWDB, 2017.
- [44] Mooley, D. A., Parthasarathy, B., Rupa Kumar, K., Sontakke, N. A., Munot, A. A. and Kothawale, D. R.: IITM Indian regional/subdivisional Monthly Rainfall data set (IITM-IMR), Indian Institute of Tropical Meteorology (IITM), 2017.
- [45] Cleveland, R. B., Cleveland, W. S., McRae, J. E. and Terpenning, I.: STL: A seasonal-trend decomposition procedure based on loess, *Journal of Official Statistics*, Vol. 19, No. 1, pp. 3-73, 1990.
- [46] Mann, H. B.: Non-parametric test against trend, *Econometrika*, Vol. 13, pp. 245-259, 1945.
- [47] Kendall, M. G.: *Rank Correlation Methods*, Charles Griffin, Page 202, 1975.
- [48] Hipel, K. W. and McLeod, A. I.: *Time Series Modelling of Water Resources and Environmental Systems*, New York: Elsevier Science, 1994.
- [49] Hirsch, R., Slack, J. and Smith, R.: Techniques of trend analysis for monthly water quality data, *Water Resources Research*, Vol. 18, pp. 107 – 121, 1982.
- [50] Sen, P. K.: Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau, *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 63, pp. 1379 – 1389, 1968.
- [51] 村岡和満, 朝位孝二: メコン河中流域における水文データの時系列傾向の分析, 水工学論文集, Vol. 57, pp. 430-463, 2013.
- [52] 寒川典昭, 鈴木將文: 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 J. JSNDS, Vol. 26, No. 4, pp. 355-365, 2008.
- [53] 松山洋, 谷本陽一: UNIX/Windows/Macintosh をつかった実践! 気候データ解析, pp. 430-463, 古今書院, 2008.
- [54] 西岡昌秋, 寶馨: Mann-Kendall 検定による水文時系列の傾向変動, 京都大学防災研究所年報, 第 46 号 B, pp. 181-192, 2003.
- [55] Lairenjam, C., Hodam, S., Bandyopadhyay, A. and Bhadra, A.: Historical and temporal trends of climate parameters in North East India, *Global NEST Journal*, Vol. 19, No. 4, pp. 547-561, 2017.

- [56] 国際協力機構：気象用マイクロウェーブ網整備計画，バンングラデシュ気象局，1988.
- [57] World Bank: Bangladesh Weather and Climate Services Regional Project, People's Republic of Bangladesh, 2016.
- [58] 村田文絵：チェラプンジ滞在記，天気，Vol. 53, 11月号，pp. 61-64, 2006.
- [59] Flood Forecasting and Warning Centre: Annual Flood Report 2017, Bangladesh Water Development Board, 2017.
- [60] Muraoka, K., Asai, K., Usui, Y. and Mochizuki, T.: Study on cause and mechanism of hydraulic structures failure in Bangladesh, *Proceedings of the 21th IAHR-APD Congress*, Yogyakarta, Indonesia, 2018.
- [61] 村岡和満：バンングラデシュの河川と水災害対策，雑誌河川，2016年9月号，pp. 104-108, 2016.
- [62] Nirapad: Bangladesh: Flash Flood Situation Update, May 03, 2017. <https://reliefweb.int>
- [63] Hyndman, R. J. and Khandakar, Y.: Automatic time series forecasting: the forecast package for R, *Journal of Statistical Software*, Vol. 26(3), 2008.
- [64] R Core Team, R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>, 2018.
- [65] Nury, A. H. and Hasan, K.: Analysis of drought in Northwestern Bangladesh using standardized precipitation index and its relation to Southern oscillation index, *Environmental Engineering Research*, Vol. 21(1), pp. 58-68, 2016.
- [66] 国土交通省：河川砂防技術基準調査偏，国土交通省水管理・国土保全局，2014.
- [67] 西澤誠也：気象観測データの長期トレンドの統計解析，応用数理，第18(3)号，pp. 201-212, 2008.
- [68] IPCC: Climate Change 2014: Synthesis Report of the IPCC Fifth Assessment Report (AR5), IPCC, Geneva, Switzerland, 151pp., 2014.
- [69] Karl, T. R. and Knight, R. W.: Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States, *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 79, pp. 231-241, 1998.
- [70] Trenberth, K. E.: Atmospheric moisture residence times and cycling: Implications for rainfall rates and climate change, *Climatic Change*, Vol. 39, Issue 4, pp. 667-694, 1998.

- [71] Kunkel, K. E. and Andsager, K.: Long-term trends in extreme precipitation events over the conterminous United States and Canada, *Journal of Climate*, Vol. 12, pp. 2515-2527, 1999.
- [72] Iwashima, T. and Yamamoto, R.: A statistical analysis of the extreme events : Long-term trend of heavy daily precipitation, *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, Vol. 71, Issue 5, pp. 637-640, 1993.
- [73] Yamamoto, R. and Sakurai, Y.: Long-term intensification of extremely heavy rainfall intensity in recent 100 years, *World Resource Rev.*, Vol. 11, pp. 271-281, 1999
- [74] 国土交通省河川局河川環境課 監修：水文観測業務規程関係集，河川情報センター，2002.

第4章 ベンガル地域の長期気象水文量と地球規模現象との相関・因果関係の解明

4.1 はじめに

本章では、バングラデシュ気象局 (Bangladesh Meteorological Agency), バングラデシュ水開発庁 (Bangladesh Water Development Board) より提供を受けた降水量等の気象水文データ [75][76] と、エルニーニョ/ラニーニャの指標である南方振動指数 SOI^[77], インド洋ダイポールモード現象の指数 DMI^[78] 等の気候変動指数を用いて, 長期変化傾向と変動の特徴を分析するとともに, 降水量の変動に影響を与えている要因を定量的に明らかにすることを目的とした. 具体的には, 1) 月降水量の長周期変動パターンと SOI・DMI との相関関係, 2) 月降水量と SOI・DMI の因果関係についてそれぞれ分析した. 長周期変動パターンと相関関係については, それぞれ Wavelet 変換^[79], Cross-Wavelet 変換^[80] を用い, 気候変動のパターンと相関関係を明らかにした. また, 因果関係の分析については, ベクトル自己回帰モデル VAR を基本とした統計的因果推論手法の一つである VAR-LiNGAM^[81] を気象水文データに適用した.

4.2 既往研究

気象水文時系列の時間一周波数特性や気候変動指数との相関関係を Wavelet 変換, Cross-Wavelet 変換を使って求める手法があり, いくつかの研究事例が報告されている [82][83]. バングラデシュでは, Rahman ら^[84] が最大 69 年間の降水量のパターン変化を Wavelet 解析を用いて分析している. また Nury and Hasan^[85] は, 約 30 年間の標準化降水指数 SPI の変化傾向と, 南方振動指数 SOI の相関関係を分析している. このようにいくつかの先行研究があるが, いずれも一部の地域を対象としたものであり, バングラデシュ全土の観測データを解析した研究事例はない.

バングラデシュの洪水の要因分析を行った先行研究は, 定性的に分析しているものがほとんどであるため, 統計学的手法に基づく定量的な分析が必要である. 時系列データ同士の因果関係を求める手法として, 経済学の研究で用いられているベクトル自己回帰モデル VAR を用いた Granger 因果性検定^[86], 予測誤差分散分解^[86], LiNGAM (Linear non-Gaussian Acyclic Model)^{[87][88]} 等があるが, バングラデシュの河川水位時系列データ同士の因果関係を分析した研究事例^[89] 以外, 気象水文データに適用した研究はほとんど行われていない.

4.3 解析手法

4.3.1 Wavelet 解析

(1) Wavelet 解析

ベンガル地域の降水量の時間一周波数特性を解析するために Wavelet 変換を適用する。Wavelet 変換は、高い周波数のときは時間幅を短縮し、低い周波数のときは時間幅を広げる基底を用いるため、局所的な周波数情報が得られ効率的な時間周波数解析が可能である。

本研究では、DMI, SOI, 月降水量の原系列に対する時間一周期成分とその強度を把握することを目的に、Wavelet パワースペクトル, Wavelet の相関と位相を求めるため、大気現象, 海洋現象の解析にしばしば用いられている連続 Wavelet 変換を適用した。対応する窓関数には Morlet wavelet を用いた。

信号 $f(t)$ と wavelet 関数 $\varphi_{a,b}(t)$ との内積 (式 (4.1)) を連続 Wavelet 変換という。

$$W_\varphi[f](a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \varphi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (4.1)$$

ここで、wavelet 関数は、

$$\varphi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (4.2)$$

これは、基本 wavelet ; $\varphi(t)$ を時間軸方向に a 倍し、時間軸方向に b だけシフトして得られる。 a はスケールとよばれ、 $1/a$ は周波数に相当する。

Morlet wavelet は、三角関数の振幅がガウス関数の包絡線に変化するような原点から離れるにしたがって振幅が小さくなる振動関数 (式 (4.3)) で与えられる。

$$\varphi(t) = e^{-i\omega_0 t} e^{-t^2/2} \quad (4.3)$$

このとき、Wavelet パワースペクトルは、以下の式 (4.4) で定義される。

$$(WPS)_\varphi(a, b) = |W_\varphi(a, b)|^2 \quad (4.4)$$

(2) Cross-Wavelet コヒーレンス解析

気候変動指数の SOI および DMI がベンガル地域の降水量の変化に対し、時間一周期的にどのように影響を与えているかを把握するために、Cross-Wavelet コヒーレンス解析を解析手法として適用した。2つの時系列 $x(t), y(t)$ の Cross-Wavelet 変換は、 x, y の Wavelet 変換を W_x, W_y とすると次のように定義される。

$$W_{xy} = W_x W_y^* \quad (4.5)$$

ここで、(*)は共役複素数である。Wavelet コヒーレンスは、 W_{xy} を時間、スケールで平滑化した式 (4.6) で定義される。

$$R_{xy} = \frac{|S(W_{xy})|}{\sqrt{S(|W_x|^2)S(|W_y|^2)}} \quad (4.6)$$

ここで S は平滑化演算子であり、これはそれぞれの時系列の同じ周波数成分同士で、どれだけ相関があるかを示し、位相差は式 (4.7) になる。

$$\varphi_{xy} = \arctan \frac{I(S(W_{xy}))}{R(S(W_{xy}))} \quad (4.7)$$

ここで I は虚部、 R は実部である。

4.3.2 因果関係の分析

因果関係において、降水量や変動に対して影響を与える要素を明らかにすべく、VAR (Vector Auto Regressive) モデルを基本にした VAR-LiNGAM を適用する。ここでは、DMI、SOI とそれぞれの地点の月降水量を組み合わせ、VAR-LiNGAM で因果関係の向きと強さを推定した。結果は、因果関係ダイアグラム (DAG) で表現することとした。

解析手法には、オープンソース・フリーソフトウェアでライブラリが充実している統計解析向けのプログラミング言語 R を用いた。

(1) VAR モデル

時系列データ y_t を、定数と自身の p 期前の過去の値に回帰したものであり、例えば次数 p の VAR モデルは式 (4.8) で表現できる。

$$y_t = c + \Phi_1 y_{t-1} + \dots + \Phi_p y_{t-p} + \varepsilon_t, \quad \varepsilon_t \sim W.N.(\Sigma) \quad (4.8)$$

ここで y_t は t 時刻の水文量 (n 行のベクトル)、 c は定数項、 Φ_1 概 Φ_p は係数行列 ($n \times n$)、 ε_t は攪乱項である。例えば、次数 $p = 1$ の 2 変量の VAR(1) モデルは、式 (4.9) で示される。

$$\begin{cases} y_{t,1} = c_1 + \Phi_{11} y_{t-1,1} + \Phi_{12} y_{t-1,2} + \varepsilon_{t,1} \\ y_{t,2} = c_2 + \Phi_{21} y_{t-1,1} + \Phi_{22} y_{t-1,2} + \varepsilon_{t,2} \end{cases} \quad (4.9)$$

上記モデルからもわかるように、時系列 $y_{t,1}$ と $y_{t,2}$ はお互いに影響を与え、かつ受ける構造となっている。

(2) VAR-LiNGAM (Linear Non-Gaussian Acyclic Model)

VAR-LiNGAM では、連続な観測変数 $x_{t,i}$ に与える影響の強さを示す。また、回帰係数 $B_{t-k,ij}$ は、行成分の変数が生成される順序に並べると、下三角行列となる。その順序を求めるために独立成分分析 (Independent Component Analysis: ICA) [90]、下三角行列を求めるためにコレスキー分解 [91] を用いる。その結果用いた行列演算によって回帰係数 $B_{t-k,ij}$ が求められる。以下手順を説明する。

式 (4.8) の攪乱項 ε_t の分散共分散行列 Σ は次式で表される。

$$\Sigma = \text{Var}(\varepsilon_t) = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \rho\sigma_1\sigma_2 \\ \rho\sigma_1\sigma_2 & \sigma_2^2 \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

Σ に独立成分分析を行い、その結果に基づき変数を原因と結果の順になるように並べかえる。この操作を $ICA(\Sigma)$ とし、並べかえ後の行列を分散共分散行列 Σ_{ICA} とする。

$$\Sigma_{ICA} = ICA(\Sigma) \quad (4.11)$$

Σ_{ICA} をコレスキー分解し、下三角行列 P を生成する。

$$PP^{-1} = chol(\Sigma_{ICA}) \quad (4.12)$$

ここで下三角行列 P は、以下のように表される。

$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & 0 \\ P_{21} & P_{22} \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

下三角行列 P と P の対角成分を抽出した対角行列 D より復元行列 W が生成される。

$$D = \begin{pmatrix} P_{11} & 0 \\ 0 & P_{22} \end{pmatrix} \quad (\text{diag}(D) = \text{diag}(P)) \quad (4.14)$$

$$\begin{aligned} DP^{-1} &= \begin{pmatrix} P_{11} & 0 \\ 0 & P_{22} \end{pmatrix} \frac{1}{P_{11}P_{22}} \begin{pmatrix} P_{22} & 0 \\ -P_{21} & P_{11} \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{P_{11}P_{22}} \begin{pmatrix} P_{11}P_{22} & 0 \\ -P_{21}P_{22} & P_{11}P_{12} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-P_{21}}{P_{12}} & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4.15)$$

算出した復元行列 W と単位行列 I より以下の式に従って、基準回帰係数 B_0 が生成される。

$$B_0 = (I - W) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \frac{P_{21}}{P_{12}} & 0 \end{pmatrix} \quad (4.16)$$

基準回帰係数 B_0 と VAR 係数 Φ を用いて回帰係数 \hat{B} が順次算出される。

$$\hat{B} = (I - B_0)\Phi \quad (4.17)$$

この回帰係数 \hat{B} が過去の各時刻から現在への影響の強さを示す。 \hat{B} の値を評価することで因果関係を明らかにすることが可能となる。

4.4 解析結果と考察

4.4.1 降水パターン変化と気候変動指数の相関関係

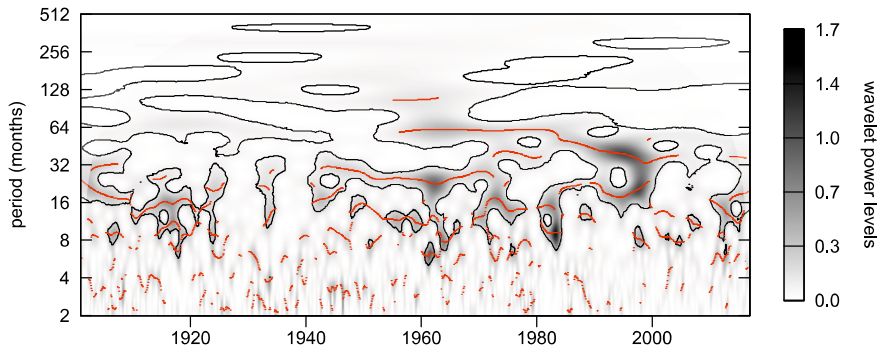
(1) 月降水量の周期変動

第3章で降水量の周期変動について、気候変動規模の現象との関連性が推察されることを述べた。ここでは、ベンガル地域の1年周期以外の周期変動と気候変動指数との関係を明らかにするために Wavelet 変換を用いて、エルニーニョ/ラニーニャの指標 SOI とインド洋ダイポールの指標 DMI, バングラデシュの32地点, インドの1地点, および1地域の月降水量を分析した。結果を図4.1(a)～(d)に示す。黒の実線は5%水準で有意なパワースペクトルの範囲を, 赤の実線はパワースペクトルのリッジを示している。図4.1(a)と(b)を比較すると, DMIは8～32ヶ月周期の変動が卓越するのに対して, SOIは32～64ヶ月周期前後の変動が卓越している。また DMIは1960～2000年にかけて64ヶ月周期の変動も存在し, その周期が1980年を過ぎた頃から徐々に短くなっている。2000年以降は明確な連続した周期変動はみられない。

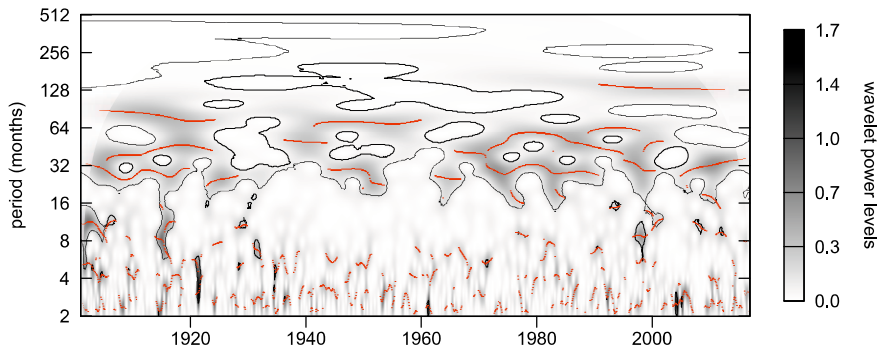
月降水量については Cherrapunjee の解析結果を示す。原系列は12ヶ月の明確な周期を持っていることから, 図4.1(c)のような結果になるのは当然であり, 12ヶ月以外の周期が不明瞭になる。そのため STL で分解したトレンド系列を解析し, その結果を図4.1(d)に示す。Cherrapunjee の月降水量のトレンド系列は, 16～64周期の変動が卓越しており, 特に1960～2000年にかけて連続しており, パワースペクトルも大きい。これは DMI の解析結果とほぼ同じであり, 何らかの相関性が推察される。なお, Cherrapunjee 以外のバングラデシュ32地点の解析もほぼ同様の結果となった。

(2) 標準化降水指数 SPI

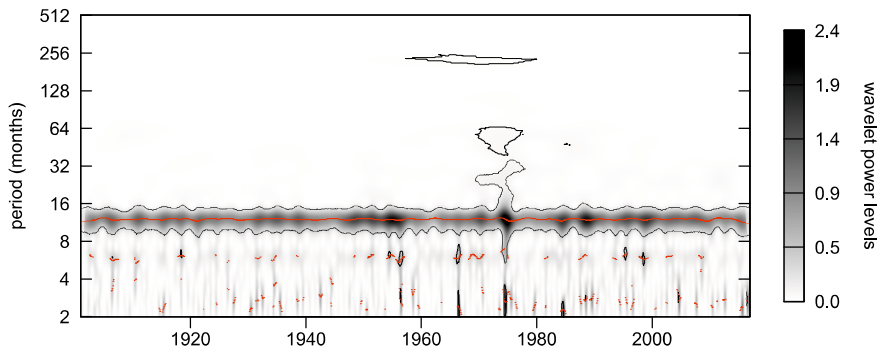
気候変動指数との相関・因果関係を解析する際は, 観測データの原系列を標準化降水指数 SPI に変換し, 解析する時系列データとした。



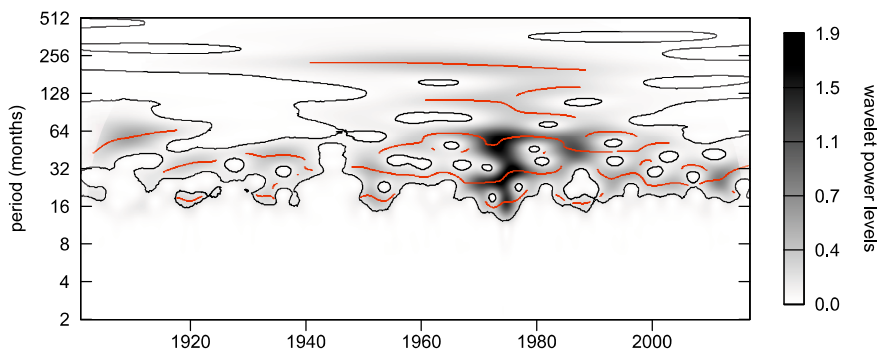
(a) DMI の Wavelet Power Spectrum



(b) SOI の Wavelet Power Spectrum



(c) Cherrapunjee における降水の Wavelet Power Spectrum



(d) Cherrapunjee における降水トレンドの Wavelet Power Spectrum

図 4.1 Wavelet による SOI, DMI と月降水量の解析結果

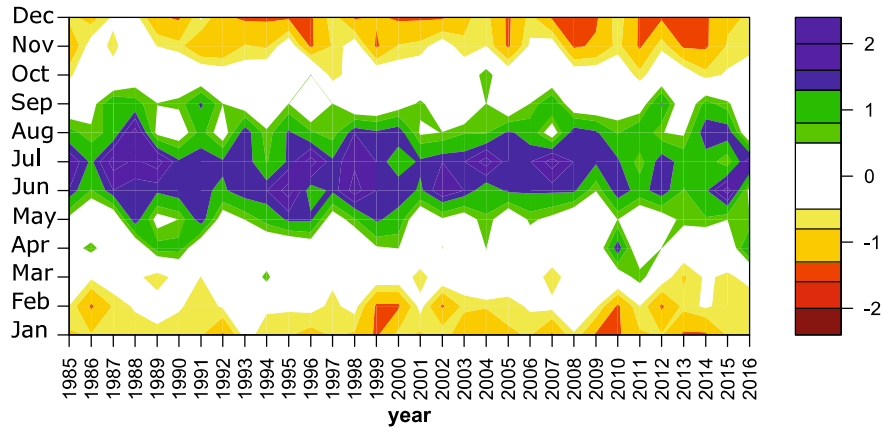
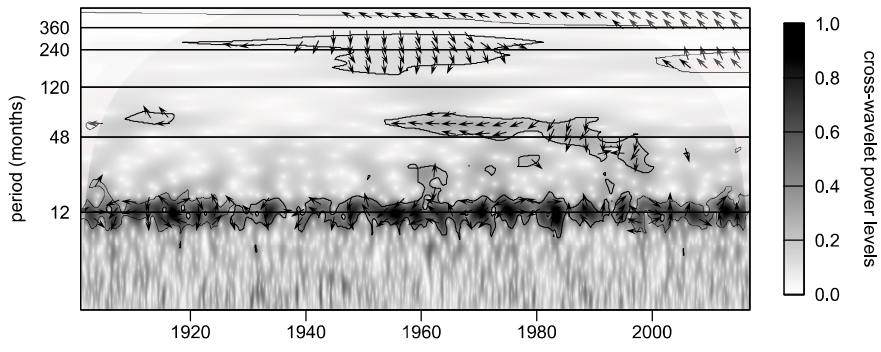


図 4.2 Cherrapunjee の SPI の変化

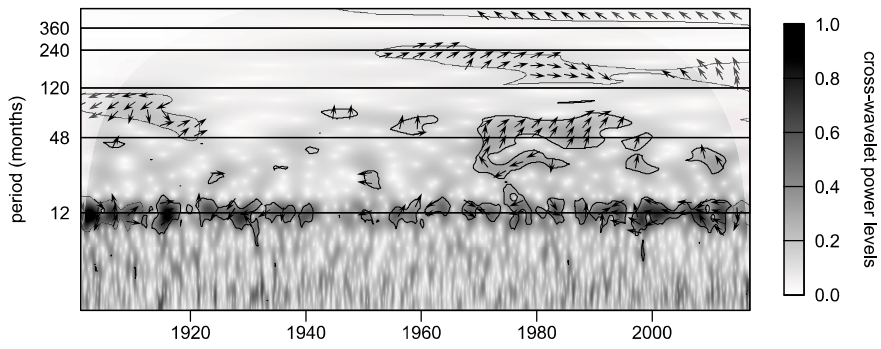
SPI とは降水量の確率頻度を正規分布に対応させ、その標準偏差で規格化した値である。対象期間の降水量と同時期に平均的に期待される降水量との差がどの程度の頻度で起こり得るかという情報を持つ。降水量と SOI, DMI 等の気候変動指数との関係を解析する際には、同じ意味合いのある指数で解析することが妥当と考え、月降水量から SPI を計算した。1985～2016 年の Cherrapunjee の SPI の変化を図 4.2 に示す。2010～2011 年と 2015～2016 年付近で、3 月から 4 月にかけて SPI が 0.5 以上になっている。これは、乾季の終わりに季節外れの大雨がメガラヤ山地に降っていることを示しており、直下流のハオールでのフラッシュ洪水被害につながっている。

(3) SOI, DMI と SPI の関係

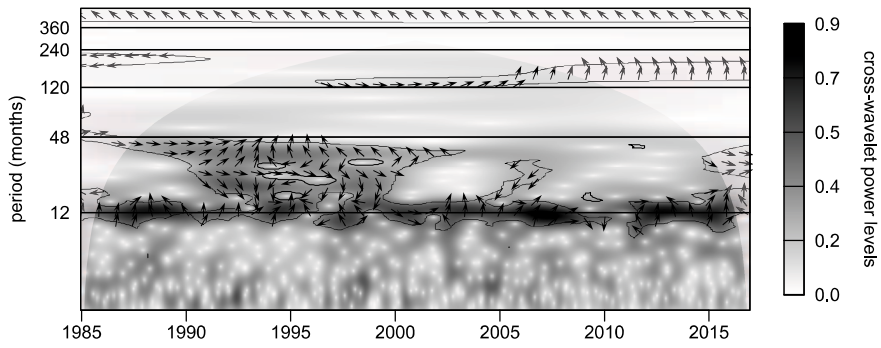
Wavelet 解析で指摘した気候変動指数との関係について周期毎の相関と相関強度を調べるために、Cross-Wavelet コヒーレンス解析を SOI, DMI と SPI の組み合わせで実施した。Cherrapunjee, Dhaka, Teknaf の SPI と SOI, DMI それぞれの解析結果を図 4.3(a)～(f) に示す。黒の実線は 5% 水準で有意なコヒーレンスの範囲を、矢印はその周期での位相差を示している。すべてのケースにおいて、12 か月周期に有意なコヒーレンスの極大値がみられ、この周期での強い相関がみられることを意味する。Cherrapunjee の解析結果の図 4.3(a) と (b) を比較すると、DMI との関係では 1960～2000 年にかけて 48 ヶ月周期前後の相関もみられ、同様に SOI との関係では 1970～1990 年にかけて相関もみられる。また、それぞれの位相差は DMI と SOI の結果で逆転している。有意なコヒーレンスの範囲は、SOI よりも DMI のほうが明瞭である。これは、SOI よりも DMI のほうが SPI と強い相関があることを意味している。Dhaka および Teknaf の解析結果 (図 4.3(c)～(f)) についても、同様の結果が得られたが、一部、降水量の多い Teknaf については、48 ヶ月周期前後の有意な相関はみられなかった。



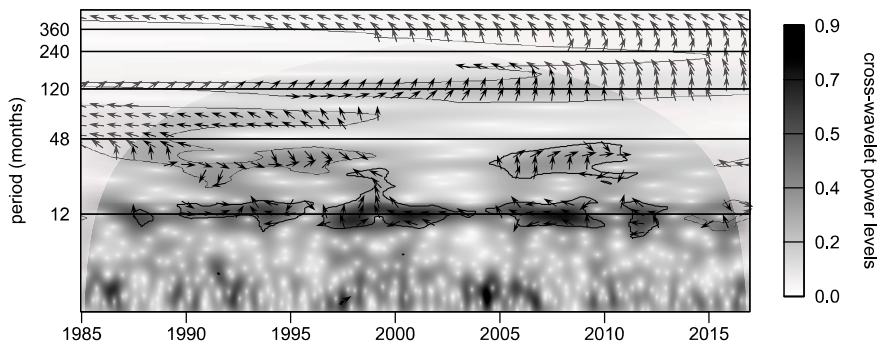
(a) Cherrapunjee の SPI と DMI の Cross Wavelet Power



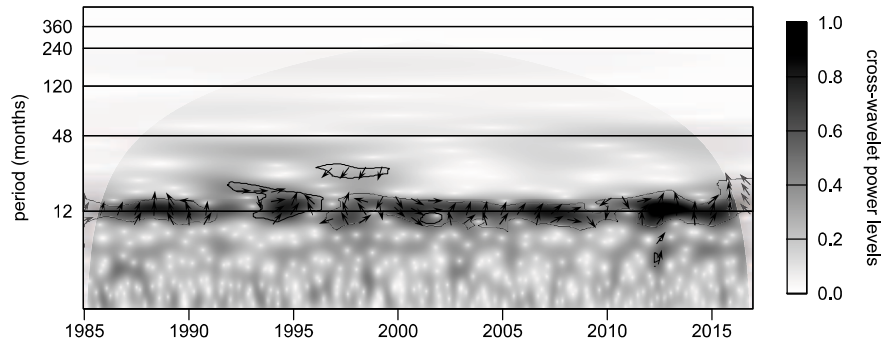
(b) Cherrapunjee の SPI と SOI の Cross Wavelet Power



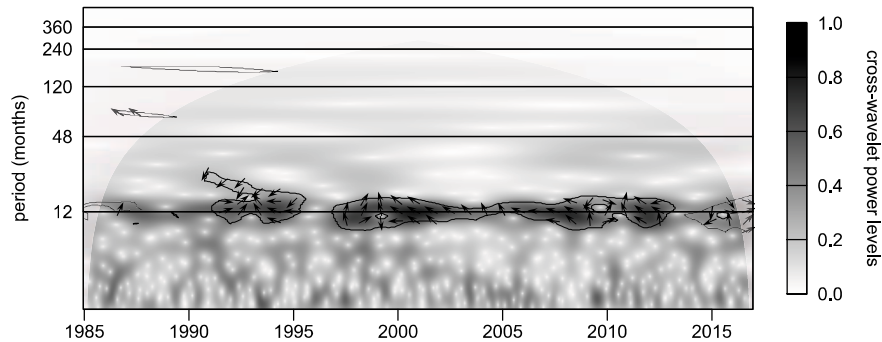
(c) Dhaka の SPI と DMI の Cross Wavelet Power



(d) Dhaka の SPI と SOI の Cross Wavelet Power



(e) Teknaf の SPI と DMI の Cross Wavelet Power



(f) Teknaf の SPI と SOI の Cross Wavelet Power

図 4.3 Cross-Wavelet による SOI, DMI と SPI の解析結果 (DMI と SOI の比較)

4.4.2 時系列データ同士の因果推論

(1) SOI と DMI の因果関係

4.4.1(3) では SOI, DMI と降水量指数との相関関係を明らかにしたが, 本項では, その現象同士の時間差 (lag) を考慮した因果関係や因果の向き, 強さに着目する. まずは, SOI と DMI の因果関係について VAR-LiNGAM を用いて解析した. それぞれの時間差 (lag) における回帰係数 \hat{B} を表 4.1 に示す.

太字は, その回帰係数が 1%水準で有意であることを示す. 表 4.1 から, 3期 (3ヶ月) 前と 1期 (1ヶ月) 前の SOI が DMI に対し 1%水準で有意な影響を与えていることがわかる.

また, 回帰係数に着目すると, 自己相関係数のほうが相互相関係数よりも約 20 倍程度大きく, SOI から DMI への影響は有意な因果関係が成立するが, その影響度は小さいということがわかる. これを因果関係ダイアグラム (DAG) として表わすと, 図 4.4 のようになる. 以下, ベンガル地域の降水量に対する SOI, DMI の影響の有無を明らかにするために VAR-LiNGAM を適用し, その結果を DAG に示した. なお, 相互の因果関係だけに着目するため, 自己への有意な因果関係 (自己回帰係数) については因果方向の矢印と数字は表記を省略した.

表 4.1 それぞれの時間差 (lag) における回帰係数 \hat{B}

	VAR-LiNGAM with 1 lag		VAR-LiNGAM with 2 lag		VAR-LiNGAM with 3 lag	
	SOI	DMI	SOI	DMI	SOI	DMI
SOI	0.369	0.158	0.261	-0.155	0.152	0.00499
St. error	0.0511	0.225	0.0534	0.283	0.0519	0.221
DMI	-0.0443	0.762	-0.0130	0.0412	0.0346	-0.0569
St. error	0.0116	0.0511	0.0121	0.0642	0.0118	0.0501

The coefficient in bold are significantly different from zero using a t-test zero using a t-test at significance level 1%.

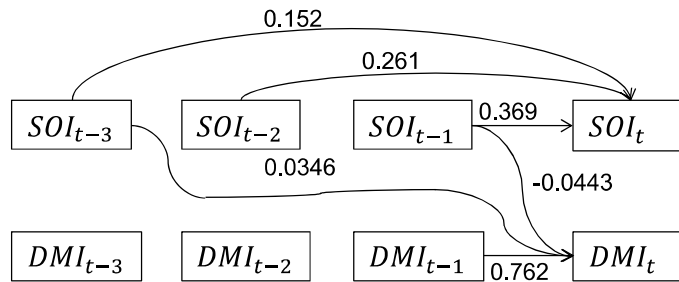


図 4.4 SOI と DMI の因果関係

(2) 気候変動指数と降水量の因果関係

降水量は、MK 検定の結果バングラデシュで有意な上昇傾向があった 1 地点 (Teknaf), 有意な減少傾向のあった 3 地点 (Dhaka, Sylhet, Mymensingh), 有意な変化がみられなかった 1 地点 (Chandpur) の図 4.5 計 5 地点を選び、SOI, DMI との因果関係について VAR-LiNGAM で解析した。これらの代表として、Sylhet の解析結果を図 4.6 に示す。

Dhaka, Sylhet, Mymensingh では、降水量に対し 5～6 期 (5～6 ヶ月) 前の DMI から有意な影響が出力された。また、Sylhet では 3～4 期 (3～4 ヶ月) 前の SOI から有意な影響が出力されている。Sylhet の降水量は Dhaka, Mymensingh のそれと比較すると約 2 倍で、SOI の変動からの影響も出ていると考えられる。一方、Teknaf では、DMI からの影響は出力されず、5 期 (5 ヶ月) 前の SOI からの強い影響が出力された。Teknaf の降水量も Dhaka, Mymensingh の約 2 倍で、SOI からの影響がみてとれる。Chandpur では、DMI, SOI ともに因果関係はみられなかった。

これらの結果から、降水量が多い地点では SOI からの有意な影響が、降水量に有意な減少傾向のある地点では、DMI からの有意な影響があり、降水量に有意な変化の見られない地点では、DMI, SOI ともに有意な影響は無いことが明らかになった。また、降水量に有意な変化の見られない地点では、4.4.1(3) の結果も考慮すると、降水量と DMI, SOI との関係について「相関関係がある」が「因果関係はない」こともわかった。

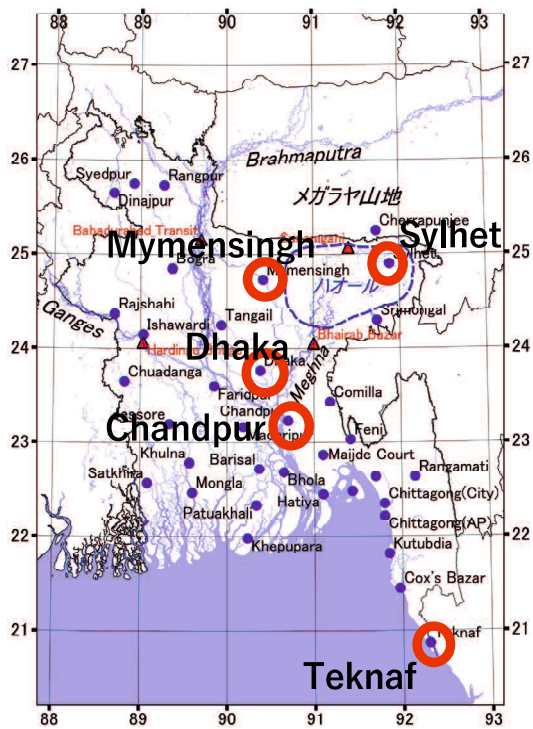


図 4.5 位置図

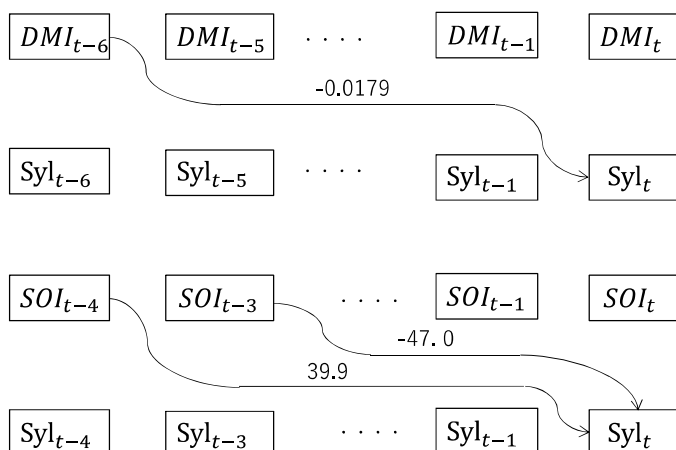


図 4.6 SOI, DMI と Sylhet の降水量との因果関係

4.5 本章のまとめ

本章では、ベンガル地域の水文データと気候変動指数を用いて、その長期間変動と相関・因果関係について wavelet, cross-wavelet, VAR-LiNGAM モデルで分析した。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) ハオールの洪水被害の原因になっているメガラヤ山地の季節外れを大雨が、SPI を使って確認できた。
- 2) Wavelet 解析の結果から、世界で最も雨の多いメガラヤ山地に位置する Cherrapunjee の月降水量のトレンド系列は、16～64 ヶ月周期の変動が卓越しており、この傾向は DMI の分析結果と一致していることが明らかになった。
- 3) Cross Wavelet 解析の結果から、バングラデシュにおける標準降水指数 SPI は、SOI よりも DMI とのほうがより強い相関があることが示された。
- 4) ベンガル地域の降水量は、SOI よりも DMI との相関がある地点が大多数である。それらの地点では、5～6 ヶ月の時間差で DMI から降水量への因果関係が存在することが明らかになった。一方で、降水量が多い地点では、DMI よりも SOI の影響が大きいことも新たに明らかになった。
- 5) VAR-LiNGAM を気象水文時系列データに適用し、適切な結果が得られ、因果関係の分析に有用な手法であることを確認できた。

参考文献

- [75] Bangladesh Meteorological Department: Meteorological Observation Dataset from 1985 to 2016, Bangladesh Meteorological Department, 2016.
- [76] Bangladesh Water Development Board: Hydrometeorological Dataset from 1987 to 2017, Flood Forecasting Warning Center of BWDB, 2017.
- [77] Ropelewski, C. F. and Jones, P. D.: An extension of the Tahiti-Darwin Southern Oscillation Index, *Monthly Weather Review*, Vol. 115, pp. 2161-2165, 1987.
- [78] Iizuka, S., Matsuura, T. and Yamagata, T.: The Indian Ocean SST dipole simulated in a coupled general circulation model, *Geophysical Research Letters*, Vol. 27, No. 20, pp. 3369-3372, 2000.
- [79] Torrence, C. and Compo, G. P.: A practical guide to wavelet analysis, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 79 (1), pp. 61 – 78, 1998.
- [80] Veleda, D., Montagne, R. and Araujo, M.: Cross-wavelet bias corrected by normalizing scales, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 29, pp. 1401 – 1408, 2012.
- [81] Moneta, A., Entner, D., Hoyer, P. and Coad, A.: Causal inference by independent component analysis with applications to micro- and macroeconomic data, *Jena Economic Research Papers 2010-031, Friedrich-Schiller- University Jena*, 2010.
- [82] Hu, B. Z. and Nitta, T.: Wavelet analysis of summer rainfall over North China and India and SOI using 1891-1992 data, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 74, No. 6, pp. 833-844, 1996.
- [83] Santos, C. A. G., Galvão, C. O., Suzuki, K. and Trigo, R. M.: Matsuyama City rainfall data analysis using wavelet transform, *Annual Journal of Hydraulic Engineering-JSCE*, Vol. 45, pp. 211-216, 2001.
- [84] Rahman, A., Anik, A. M., Farhana, Z., Devnath, S. and Ahmed, Z.: Pattern recognition of rainfall using wavelet transform in Bangladesh, *Open Journal of Statistics*, Vol. 8, pp. 134-145, 2018.
- [85] Nury, A. H. and Hasan, K.: Analysis of drought in Northwestern Bangladesh using standardized precipitation index and its relation to Southern oscillation index, *Environmental Engineering Research*, Vol. 21(1), pp. 58-68, 2016.
- [86] 沖本竜義：経済・ファイナンスデータの軽量時系列分析（統計ライブラリー），朝倉書店，2010.2.

- [87] Shimizu, S., Hoyer, P. O., Hayvarinen, A. and Kerminen, A.: A linear non-Gaussian acyclic model for causal discovery, *Journal of Machine Learning Research*, Vol. 7, pp. 2003-2030, 2006.
- [88] 清水昌平：統計的因果探索，講談社，2017.5.
- [89] 村岡和満，朝位孝二：グレンジャー因果性検定を用いたバングラデシュの水文時系列データ解析，第71回土木学会中国支部研究発表会発表概要集，pp. 70-71, 2019.
- [90] Hyvärinen, A., Karhunen, J. and Oja, E.: *Independent Component Analysis*, John Wiley & Sons, 2001.
- [91] 木村英紀：線形代数—数理科学の基礎，東京大学出版会，2003.

第5章 RRIを用いたバングラデシュ三大河川の流出氾濫再現計算と洪水の要因分析

5.1 はじめに

バングラデシュは、ガンジス川、ブラマプトラ川、メグナ川（以下、三大河川と呼ぶ）の国際河川が形成する大デルタ地帯、すなわち最下流域に位置している。国土の約8割が洪水氾濫原であり、その5割が標高5m以下の低平地で毎年国土の約2割が浸水する。人々は古くから洪水を生活の中に取り込み、洪水と共存”living with flood”して暮らしてきた。しかし、1974年比で2倍となった人口や近年の著しい経済発展など、社会環境の大きな変化が要因となり、洪水等の水災害の影響は深刻になりつつある。国土の3割以上が浸水するような大洪水は、およそ7年に一度の確率で発生している。

水災害対策を計画実行しているバングラデシュ水開発庁は、我が国など様々なドナーの協力のもと、洪水対策計画（Flood Action Plan）^[92]を策定し、降水量、河川水位、流量等の観測システムや洪水予測システムの整備を進めてきた。しかし、バングラデシュを対象とした河川改修の計画の基礎となる流出解析モデルや、洪水ハザードマップの基礎資料となる氾濫解析モデルは、一部の支川流域を対象とした研究を除いて過去に例がない。これは、三大河川の流域のほとんどがインド、中国など国外にあり、流出氾濫解析モデルに不可欠となる降水量、デジタル標高マップ（DEM）、土地利用データなどの入手が困難であったことが理由としてあげられる。一方で近年、衛星観測技術が発展し、リモートセンシングを用いたこれらのデータが容易に入手できるようになってきた。また、観測データの乏しい、あるいは入手困難な開発途上国の河川流域でも流出氾濫解析が可能なソフトウェア開発も同時に進められてきた。例えば、佐山ら^[93]によって開発されたRRI（Rainfall Run-off Inundation Model）がある。RRIは、山地・平野を問わず、降雨流出から洪水氾濫までを流域一体で解析する降雨流出氾濫モデルであり、流域全体でその地域がどのように氾濫するかを降雨情報から大まかに予測することが可能で、バングラデシュのように流域の各地で氾濫が発生する大規模洪水の再現や予測に適している^[93]。

バングラデシュの河川を対象とした流出氾濫解析の先行研究として、岡^[94]によりTeesta（ティースタ）川流域、メグナ川上流部上流域、およびガンジス川流域について分布型流出モデルを用いて流出解析を実施した既往研究があり、大洪水のあった1987年、1988年の流出量を再現し、降雨の特徴などの洪水の要因を考察している。また、同時にメグナ川流域のハカルキハオールの氾濫湖の浸水シミュレーションを実施し、ハオールの開発と積極的利用

について考察している。中尾^[95]は、バングラデシュの治水計画に関する研究で、三大河川流域の降水分布や流出の傾向を捕まえ、ブラマプトラ川の流量と水位変動の特徴を観測データから分析し、治水施設整備の可能性とともに、Flood Action Plan^[92]と比較しながら、洪水対策はいかにあるべきかを述べているが、物理モデルを用いた定量的な解析はなされていない。流出解析に関する研究としては、HEC-RASを用いてバングラデシュ国内に限って一次元流出モデルを構築し、100年後の水位変化量を予測した研究事例^[96]や、ブラマプトラ川の流出モデルをブロック型TOPMODEL^[97]を使って構築し、1981年から1990年まで10年間の流出を再現した研究事例^[98]がある。氾濫解析に関する研究では、メグナ川の支川スルマ川(Surma river)流域に位置するシレット市の洪水ハザードマップ作成を目的に、SRTM標高データを用いて河川水位からレベルバックで浸水区域を表示させた先行研究^[99]がある。また、橋本ら^[100]は、都市スケールでの洪水ハザードマップ作成を目的に、北西部のガイバンダにおいてネスティングモデルを用いて都市スケールの氾濫解析を実施しているが、解析期間が長期であることから降雨の影響を考慮した解析を行う必要があることを課題として挙げている。中尾^[95]の研究をのぞき、いずれの先行研究も一部の支川流域など国内の限られたエリアを対象とした流出解析や氾濫解析であり、流域全体として一体的に議論されている先行研究は事例がない。

一方近年、RRIを活用した研究が増えてきており、流域全体での流出氾濫解析のみならず、様々な降水データセットを活用したモデルの比較検証(例えば、^[101])や、再解析プロダクトを用いた流出氾濫の将来変化予測(例えば、^[102]等)などが研究されている。また、大規模河川流域のみならず、我が国の河川で頻発する洪水災害の検証(例えば、^[103]^[104]等)、地区レベルの洪水脆弱性把握手法の検討^[105]、簡易的な洪水ハザードマップの作成^[106]にも用いられ、高い評価を得ている。

海外における大河川流域を対象とした先行研究には、2011年にタイで発生したチャオプラヤ川の大洪水に対し、衛星情報を活用した緊急対応の降雨流出氾濫予測を実施した例があり、洪水の実態と照らし合わせて概ね妥当な再現性が得られたことを報告している^[107]^[108]^[109]。また、メコン川の下流域を対象とした地上観測データ、衛星観測データ、再解析プロダクトの精度比較検証^[101]や、流出氾濫量の将来予測の研究^[110]事例も挙げられる。その他、開発途上国では、インド^[111]^[112]、パキスタン^[113]、インドネシア^[114]^[115]、フィリピン^[116]、ベトナム^[117]、ミャンマー^[118]^[119]の河川や、バングラデシュの氾濫湖ハオール^[120]を対象とした研究もなされており研究実績が増えているが、大規模河川流域を対象とした活用事例は、メコン川下流域、インダス川、チャオプラヤ川を除いて未だ実績が少ない。これは、流域面積が大きくなればなるほど、河川断面の設定などモデル構築の手間が増えるとともに、計算負荷も増加し解析時間が長時間になってしまうことが一つの原因として挙げられる。

国土の約8割が氾濫域のバングラデシュにおいて、洪水やそれに伴う氾濫に最大の影響を及ぼす三大河川の流出氾濫シミュレーションモデルを構築し、過去の洪水を再現するとともに、流出氾濫形態の特徴と要因を明らかにすることが極めて重要である。また、モデルの精度が確保できれば、気候変動に伴う将来の流出氾濫予測も可能となる。さらには、近年の極

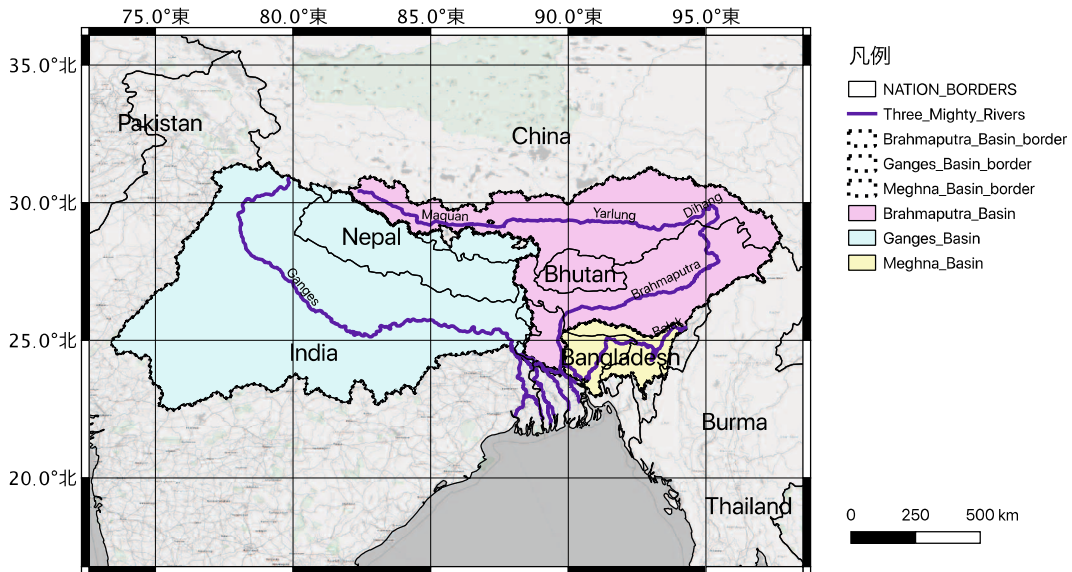


図 5.1 三大河川流域図

端な気象現象の頻発化が地球温暖化の影響であると明らかになりつつある昨今において、モデルを活用して将来の流出氾濫予測を実施することが、将来の水災害対策計画を策定する上で必要不可欠となる。

そこで本章では、流出氾濫解析モデルを構築し、バングラデシュの過去の洪水を再現、三大河川流域の降水量の分布が流出と氾濫に与える影響を明らかにするとともに、前章で明らかにした結果^[121]を用いて将来の洪水リスクを分析することを目的とした。具体的には、タイ国のチャオプラヤ川、メコン川下流域など大河川流域の流出氾濫解析で実績があり、その有用性が実証されている RRI モデルを用いて、バングラデシュ三大河川のガンジス川、ブラマプトラ川、メグナ川それぞれの流域全体で流出氾濫一体型モデルを構築した。特にメグナ川流域モデルは、バングラデシュ北東部の広大な窪地（ハオール）が複数存在し、かつ、複雑な河川ネットワークを形成する地形を有している。このような特徴のある流域での大規模な氾濫解析は過去に例がなく、本研究で初めてとりくんだものとなっている。降水データセットには衛星全球降水マップ GSMaP^[122]を用いて、過去に大きな水害のあった年（2004, 2007, 2016, 2017）の流出および氾濫解析を実施し、本川と支川の代表観測所における流量および水位変化とバングラデシュ国内における氾濫水の挙動を再現し、精度検証を行うとともに洪水の要因を考察した。また、第 3 章で明らかにした降水量の変化傾向を適用し、100 年後の流出量、氾濫面積の変化量についてシミュレーションを実施し、洪水リスクがどのように変化するかを予測した。

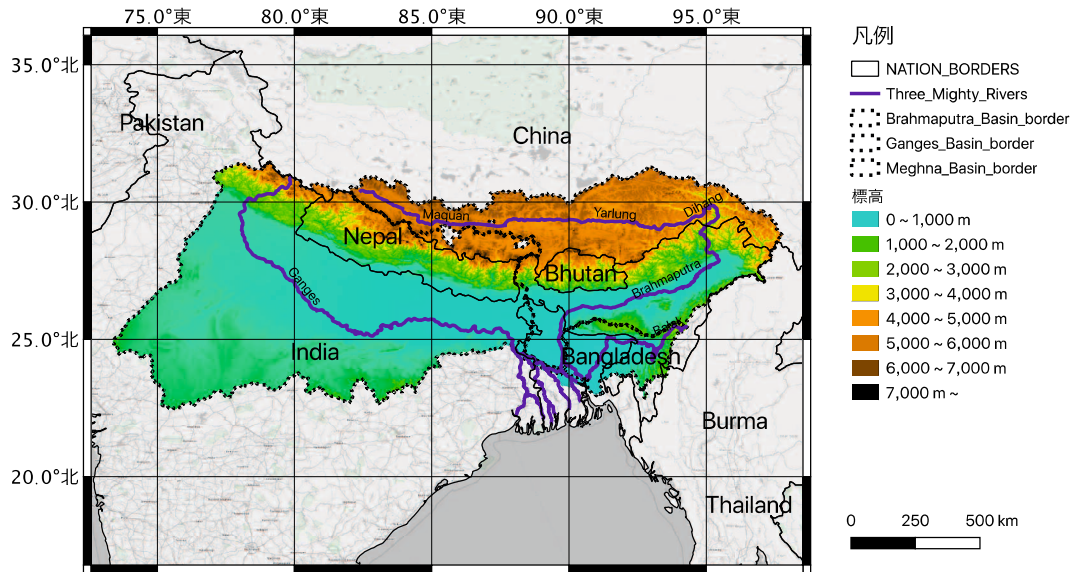


図 5.2 三大河川流域の標高

5.2 バングラデシュの水災害

5.2.1 三大河川流域と洪水の特徴

三大河川流域と流域の標高図をそれぞれ図 5.1, 図 5.2 に示す。バングラデシュは三大河川の最下流に位置する。三大河川はいずれもインド、中国など国外に源を発し、西からガンジス川、北からブラマプトラ川、北東からメグナ川が流入し、バングラデシュで大デルタ地帯を形成し、ベンガル湾に注ぐ国際河川である。東西にわたる流域の北部は標高 5,000m 以上のヒマラヤ山脈とチベット高原であり、ガンジス川はその南側に、ブラマプトラ川（中国側ではヤルツァンポ川と呼ばれる）は、チベット高原を東に流れヒマラヤ山脈を横切って迂回するように西に向きを変えて流れる。この大きく迂回する地点に「ヒマラヤに残された最後の秘峰」ナムチャバルワ（標高 7,782m）がある。

ガンジス川はバングラデシュに流入する手前のインド領内でフーグリー川が南に分流する。分流部のファラッカ堰は、水をインド南部の大都市コルカタに送る役目もあり、インドにとっては重要な水源である一方、バングラデシュでは、乾季におけるデルタ地帯の農業のための水が不足するとともに、塩水の遡上が顕著となって塩害などの弊害も発生する原因とも言われている。また、左岸側（北側）には、雨季の水位が高い時期にいくつかの中小河川がブラマプトラ川流域にも分流している。英国植民地時代に架設されたハーディング鉄道橋地点は流路が安定しており、ガンジス川の水位・流量基準観測地点ともなっている。

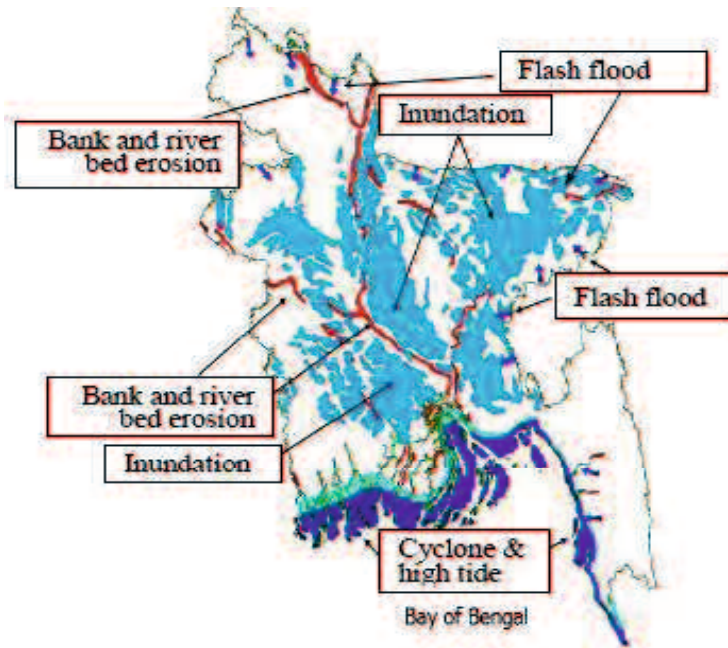


図 5.3 洪水の特徴

ブラマプトラ川は、世界有数の豪雨地帯のメガラヤ州、アッサム州を貫流した後、流路を南に変える地点で北から Dudhkumar 川、Dharla 川、Teesta 川が合流する。合流点付近の右岸側一帯のガイバンダは、ブラマプトラ川でもっとも河川侵食が激しく、堤防決壊による氾濫リスクの高い地域で、橋本ら^[100]が洪水ハザードマップ作成のための氾濫解析の対象とした地域の一つでもある。さらに南下するとブラマプトラ川の基準観測地点ともいえるバハドラバードがあり、この地点の北の左岸側で旧ブラマプトラ川がメグナ川流域に向けて分流する。中尾^[95]は、バハドラバード地点で $50,000\text{m}^3/\text{s}$ を超過すると左岸側のメグナ川流域で広範囲に浸水する、と報告している。

メグナ川の源流はインドのマニプール州（インパール作戦の地、といえは容易に地理が理解できるであろう）にあり、流域は世界有数の豪雨地帯である。バングラデシュに流入後は、北側を流れるスルマ川と南側を流れるクシヤラ川の二河川に分流し、それぞれが標高 10m 以下の低平地を延々と流れる。年間降水量の世界記録を持っているチェラプンジーが位置するメガラヤ山地からは、無数の中小河川がバングラデシュ北東部のハオールと呼ばれる窪地に流入し浸水する。雨季のハオールの浸水面積は $8,600\text{km}^2$ にも及ぶ。流域の北西からはブラマプトラ川から分流した旧ブラマプトラ川がメグナ川に合流する。メグナ川の水位・流量基準地点とも言えるバイラブバザール地点は、河口から約 300km も内陸に位置するにもかかわらず、感潮区間で乾季には干満差も観測される。

バングラデシュ国内では、三大河川の支川や分派河川が大小 200 以上も存在しており、それらが複雑なネットワークを形成している。河川の総延長は約 24,000km で、バングラデシュ水開発庁（BWDB）により 2016 年末までに延べ延長 11,436km の堤防の建設、維持管理が行われてきた^[123]が、河川侵食に起因する堤防の決壊が多発している他、維持管理予算と

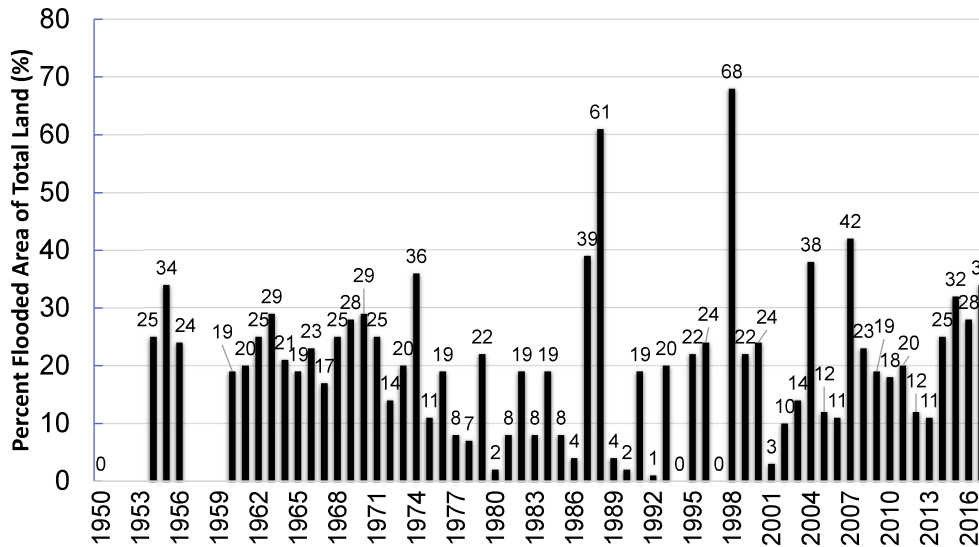


図 5.4 年毎の氾濫面積率（1950～2017）

能力不足により被災したまま放置されている堤防が多数存在しており [124][125][126]，溢水による国土の浸水を助長させる原因となっている。

バングラデシュの洪水は図 5.3 に示す 4 つの形態，(a) 3 大河川の大規模洪水，(b) ベンガル湾沿いの地域のサイクロンによる高潮，(c) ハオール地域の洪水，(d) 支川流域のフラッシュ洪水に分類される。本研究では「三大河川流域の降水量の分布が流出と氾濫に与える影響を明らかにすること」を目的の一つとしている。よって (b) および (d) は解析の対象から除外し，(a) および (c) タイプの洪水を対象とした。

5.2.2 過去の大洪水

バングラデシュは毎年国土の 2 割が浸水しているが，このような洪水は「ボルシャ」と呼ばれ，肥沃な土や魚を運ぶ豊かな自然の恵みとされており，大きな問題とはならない。一方で，浸水の割合が 3 割をこえるような洪水は「ボンナ」と呼ばれ，収穫前の稲を全滅にさせてしまうような大規模な氾濫が発生し，人々に恐れられている。このような洪水は約 7 年に一度の確率で発生している。

バングラデシュ水開発庁によって 1954 年から記録されている国土面積に対する氾濫面積率 [127] を図 5.4 に示す。歴史的な洪水で記録が残っているものとして，まずは，1987 年，1988 年の 2 年連続で襲った大洪水で，現在の治水計画である Flood Action Plan 策定の引き金になったものである。余談であるが，世界で最初にレジ袋が禁止されたのはバングラデシュである。1988 年の洪水による大規模浸水は，投げ捨てられた大量のレジ袋が洪水によって流され排水管を詰まらせたことが一因となったとも言われている。その 10 年後に襲った 1998 年の大洪水は，国土の約 7 割が長期間にわたって浸水したため未曾有の大水害となり「20 世紀最悪の洪水」と表現された。いずれの大洪水も，ガンジス川とブラマプトラ川の洪水

表 5.1 Try ら^[101]による各種雨量データセットの精度比較

Dataset	NSE	R ²	VE
Rain Gauge	0.92	0.93	0.07
APHRODITE	0.81	0.90	-0.19
GPCC	0.84	0.88	0.13
PERSIANN	0.80	0.88	0.21
GSMaP	0.42	0.73	-0.46
TRMM	0.85	0.89	0.12

が同時生起し、長期間にわたり水位の高い状態が続いたためであった。近年では、2004年、2007年、2016年、2017年と比較的大きな洪水が発生し、国土の約3割を超える浸水を伴っている。2016年の洪水ではブラマプトラ川のバハドラバード地点において、100,000m³/sを超える既往最高流量を観測した。また2017年の洪水では、乾季の終わりの3月～4月にかけて通常とは異なる大雨が降り、季節外れの浸水が発生する、というこれまでの洪水とは異なった現象も発生している。

本研究では、水位や流量などの地上観測値、リモートセンシング等での実績浸水域データが入手可能な、近年の4ケースの洪水についてRRIを用いて再現を試みた。

5.2.3 流域の降水量

流域全体の計算を実施する場合、三大河川の流域に属するインドはもちろんのこと、上流域のネパール、ブータン、中国の降水量観測データまでもが必要となる。本研究で入手した1日毎の地上観測データは、バングラデシュ国内のデータのみである。流域内全ての地上観測データを入手するには各国の機関に依頼することとなるが、一般的に開発途上国の地上観測データは我が国のように充実しておらず、たとえ入手できたとしても観測値の品質チェックやRRIに入力するための編集に多大な労力と時間を要することとなり、全地上観測データの適用は現実的に困難である。降水量の地上観測データ以外には、TRMM(3B42RT)、GSMaP、PERSIANNなどの衛星観測によるリモートセンシングデータ、過去の地上観測データをグリッド化したGPCC、APHRODITE、再解析値であるJRA55、d4PDF等がある。Tryらは、メコン川下流域においてRRIモデルを構築し、これらのプロダクトの再現精度を比較した結果、地上観測データが最も精度よく、次いで衛星観測データではTRMM(3B42RT)が精度よく再現できたという結果を報告している^[101]。表5.1にその結果を引用する。しかし、APHRODITE、TRMMをRRI入力フォーマットに編集する手順が煩雑であったため、本研究においては、グリッド間隔がもっとも短くRRIで扱いやすい編集が容易なGSMaPを利用することとした。GSMaPは最近になって地上観測雨量で補正したプロダクトが公開されており、精度も確保できると見込まれたのも理由の一つである。そこで、GSMaPの適用可能性を確かめるため、バングラデシュ周辺の地上観測データとの比較を行った。

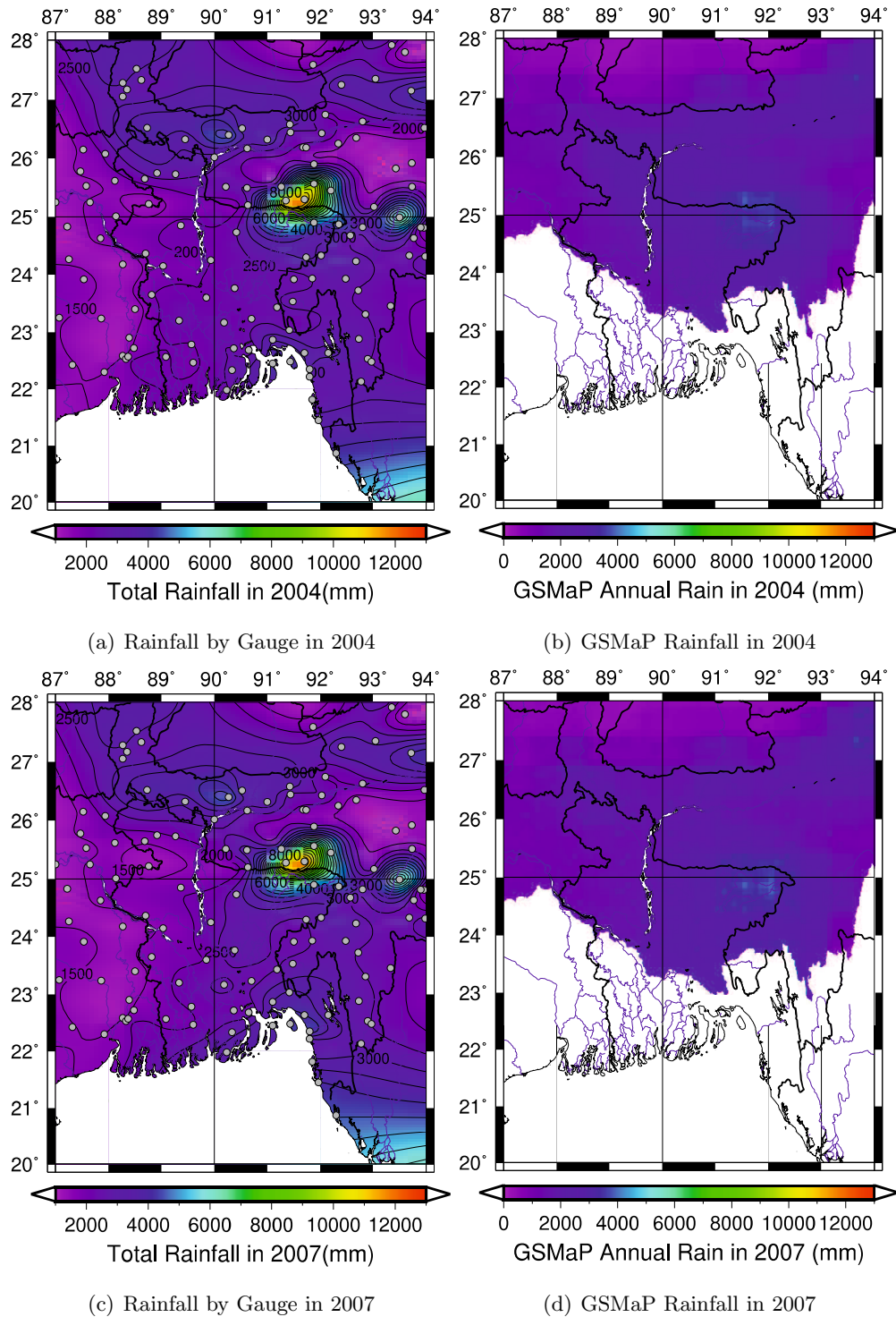


図 5.5 地上観測データと衛星観測データ GSMaP の比較

バングラデシュを中心とした三大河川流域下流地域の 2004, 2007 年の地上観測の年降水量分布と GSMaP の年間積算降水量との比較を図 5.5 に示す。GSMaP は三大河川流域内を図示し、コンターは解析範囲のみを表示している。GSMaP ではバングラデシュ北東部およびメガラヤ山地の降水量極大域、ブラマプトラ川流域アッサム州付近の降水量極大域などが

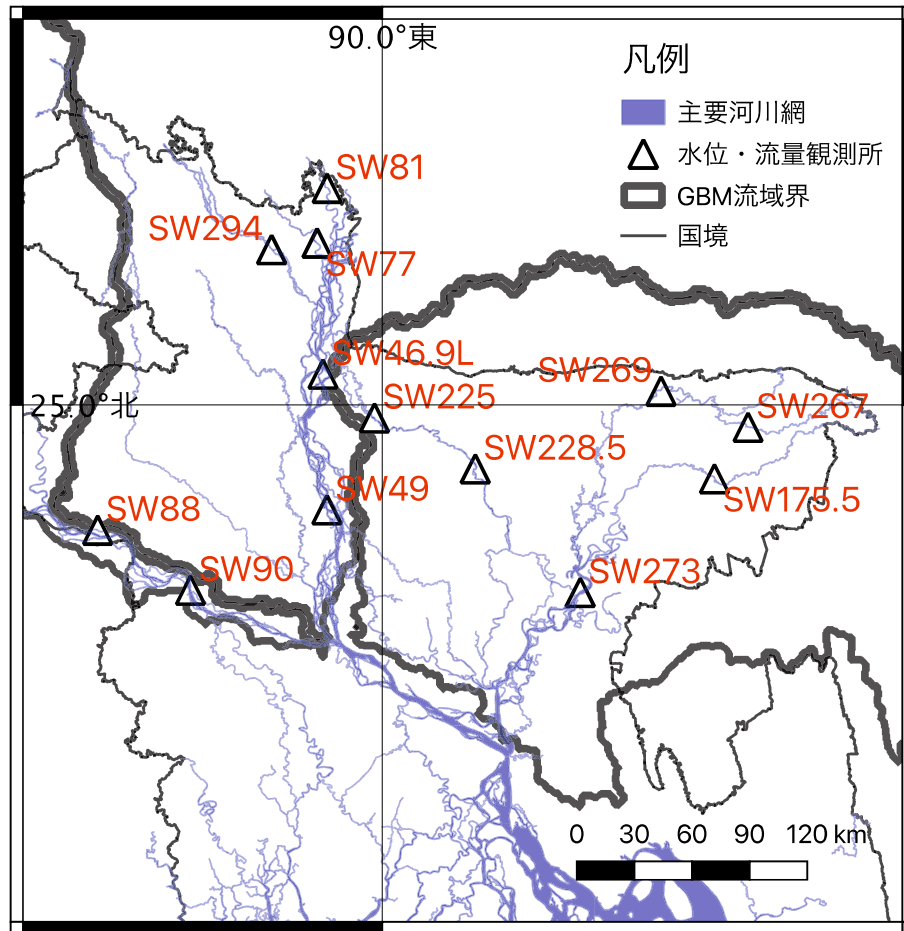


図 5.6 GBM 代表水位・流量観測所

表現できておらず，地上観測データと一致しているとは言えない．一方でインドのガンジス川流域における比較的少ない降水量の地域，バングラデシュ国内の雨については，それぞれ地上観測データと概ね一致している．ブータンについては地上降水量データが入手できていないため，ブラマプトラ川北部流域の降水量については GSMaP での降水量のほうが実状に近いと思われる．このように精度が良いとは言えないものの，GSMaP はリアルタイムで配信されており，将来的に開発途上国における洪水予測システムなどにも利用される可能性があることも考慮し，本研究では GSMaP を用いることとした．

5.2.4 河川水位流量と氾濫の形態

三大河川の代表となる水位・流量観測所の位置図を図 5.6 に示す．バングラデシュの水文観測は，各河川の観測所 354 地点で毎日 1 回，また，感潮区間においては毎日 2 回の水位観測が，そのうち 107 地点では毎月 2 回以上の流量観測が，BWDB によって実施されている．第 3 章で述べたように，熱帯モンスーン気候に属するベンガル地域は，明確な雨季と乾季が存在するため，河川水位・流量とも 1 年（12 か月）の明確な周期性をもった時系列となる．再現計算で対象とした近年の洪水，2004，2007，2016，2017 年の GSMaP の年間降水量積

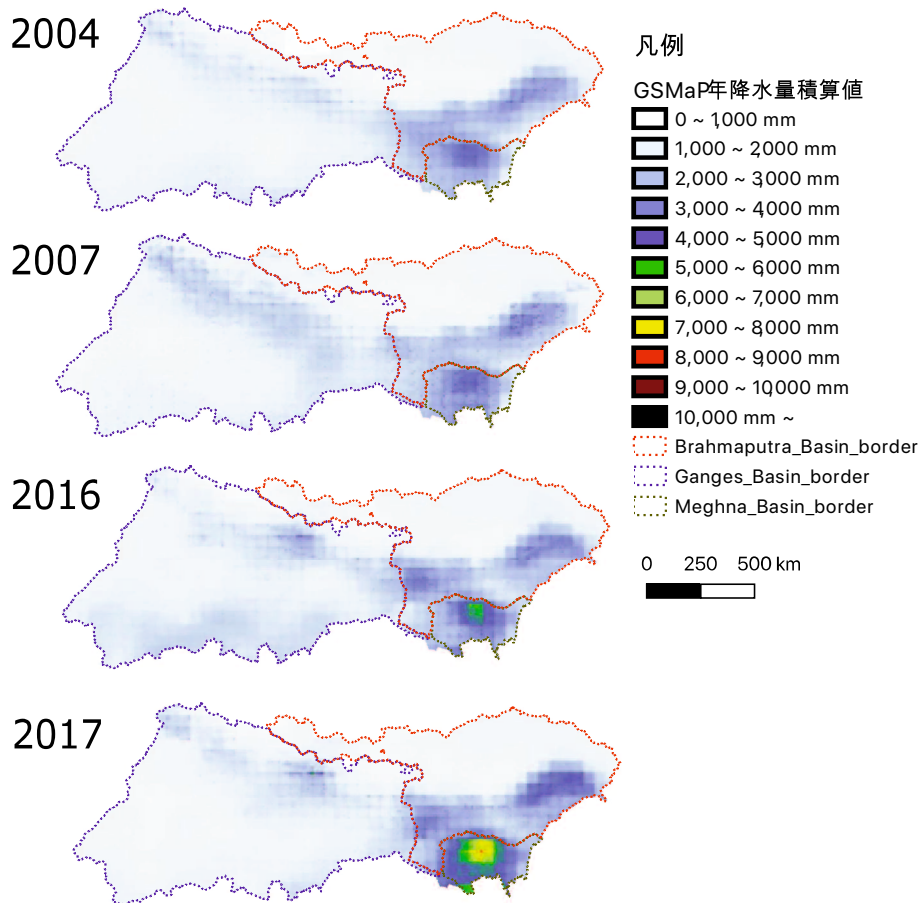


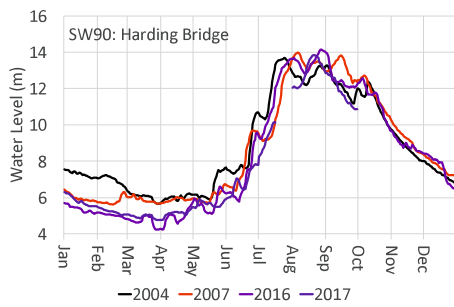
図 5.7 GSMaP の年間降水量積算値

算値を図 5.7 に、三大河川の代表観測所の水位を図 5.8 にそれぞれ示す。

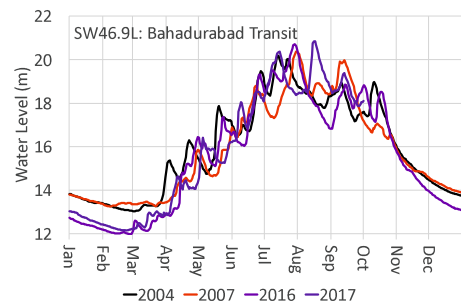
ガンジス川のハーディング鉄道橋 (SW90) 地点水位は、毎年7月頃からゆっくりと上昇し始め、8月の終わりから9月の初めにかけてピークを迎える。その後ゆっくりと下降し12月の終わり頃から5ヶ月程度の非出水期となる。ガンジス川流域の場合、上流のネパールは年間降水量が1,000mm から2,000mm の地域に2,000mm を超える地域が多少不連続に分布している。ネパールからの流出が何本かの支川にまとまりながら延々とインド平原を流下し本川と合流するが、インド平原は年間降水量が1,000mm 程度と比較的少雨の地域であるため、ガンジス川の洪水は平滑化されて流下してくると考えられる。

これに対してブラマプトラ川流域をみると、上流のチベット高原の年間降水量は300mm 以下と非常に少ない。また、標高が5,000m 以上の地域がほとんどを占めており降水量は雪になる。よってチベット高原の影響は流出にはほとんど影響がないと思われる。一方、アッサム州に見られる3,000mm から5,000mm の多雨地域はそのまま下流のバングラデシュに連続しており、アッサム州に降った豪雨がたちまち国境を超えてくることになる。

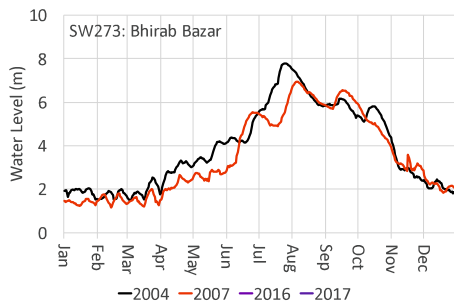
メグナ川は、流域全体が世界有数の豪雨地帯となっており、年間降水量がバングラデシュ国内でも4,000mm 以上、多い年には8,000mm を超える。よって降った雨はフラッシュ洪



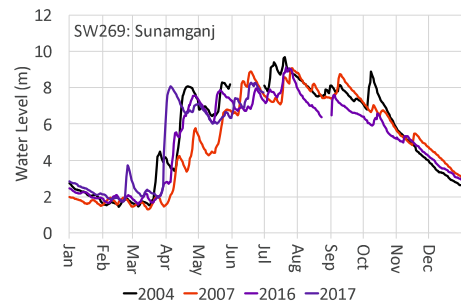
(a) Ganges



(b) Brahmaputra



(c) Meghna



(d) Haor

図 5.8 2004, 2007, 2016, 2017 年における GBM 代表観測所の水位変化

水となってバングラデシュに流入し、流域のほぼ中心であるバングラデシュ東北部の広大な窪地ハオールに流出水が約6ヶ月近くも湛水することになる。メグナ川下流には首都ダッカを含む人口密集都市が多数ある。ハオールは自然の遊水池で重要な治水機能を持っており、下流の大都市はハオールによって洪水から守られているとも言える。

以上のようにガンジス川の洪水は比較的水位変動が少なく、ブラマプトラ川やメグナ川の洪水は一つの大きな波の上に、アッサム州やメガラヤ州、またはバングラデシュ東北部の豪雨があるたびに鋭く上昇・下降する成分が乗った形となる。ブラマプトラ川のバハドラバード (SW46.9L) 地点、メグナ川のスナムゴンジ (SW269) 地点のハイドログラフからもこのことが確認できる。急激な水位の上昇によって河岸あるいは堤防を越流して広範囲の平地が浸水することとなる。なお、メグナ川のバイラブバザール (SW273) 地点は、河口から300km近く上流に位置するにもかかわらず感潮区間となっており、乾季の観測水位が周期的に変動していることが見て取れる。一方雨季は、ハオールの治水効果が発現しているためか、SW46.9LやSW269地点でみられるような豪雨に反応した鋭い上下波形は見られず平滑化されていることがわかる。

また、中尾^[95]は、ブラマプトラ川のSW46.9L地点で50,000m³/sを超過すると左岸側のメグナ川流域で広範囲に浸水する、とも述べており、構築したRRIモデルでこれらのことについても確認することとした。

RRIモデルで再現した計算流量を検証するためには、観測流量時系列が必要である。各河川の観測所で流量観測は実施されているものの、HQ曲線式は作成されていないため、時系列流量がデータベース化されていない。そのため、計算流量との比較には流量時系列を作成する必要がある。本研究では、我が国の一級河川で実用化されている式(5.1)を用いて、最小自乗法により定数 a, b を求め、観測水位から一年間の流量時系列を作成し、これとRRIで計算した流量とを比較した。なお、HQ式を作成するにあたり、異常値等の排除や適用水位範囲の決定等の判断基準については、「第2版水文観測の手引き(案)HQ曲線作成編」^[128]を参考とした。

$$Q = a(H + b)^2 \quad (5.1)$$

5.3 RRIモデルによる流出氾濫解析

5.3.1 RRIモデルの適用

RRIモデルは、衛星技術や気象予測情報を活用し、世界各地の大規模洪水を河川水位・流量から洪水氾濫まで準リアルタイムで一体的に予測することを目的に開発された。山地・平野を問わず流域全体をグリッドセルに分割し、二次元で降雨流出から洪水氾濫までを一体的に解析することが可能である。また、任意の河道区間における河川水位や流量、および流域全体で浸水深の分布の時間的変化を計算することもできる。

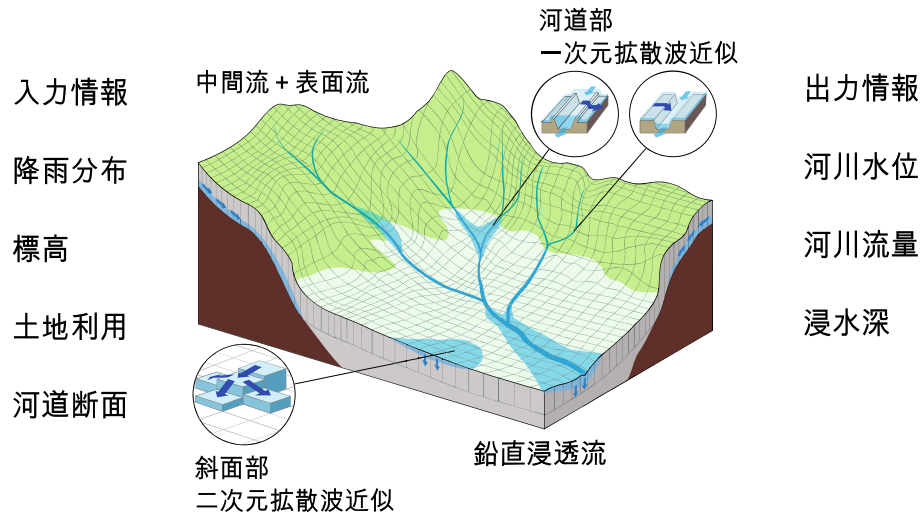


図 5.9 RRI モデルの概要

RRI モデルの概要を図 5.9 に示す。降雨分布、標高、土地利用、河道断面の各種データを入力情報として、分布型降雨流出モデル、河道追跡モデル、洪水氾濫モデルを一体的に計算することにより、低平デルタを含む広域の洪水現象を的確に表現する。斜面部には二次元拡散波近似式に可変時間ステップアルゴリズムを適用することで、地形起伏の複雑な山地域でも高速に計算できる。また、平野部における鉛直浸透流、山地域における側方地中流、蒸発散と土壌の乾燥による蒸発抑制、ダムや放水路などの影響など、複雑な水文過程も反映させることができる。特に、標高などの地形情報には HydroSHEDS をそのまま利用することができたり、降雨分布情報には衛星降雨プロダクトなどを RRI モデル入力形式に編集できるツールも付属していたり、またそれらを GUI で直感的に処理することもできるなど、開発途上国の研究者や技術者にも取り扱いやすい設計となっている。

バングラデシュのように国際河川の最下流に位置し、氾濫原が国土の 8 割を占める国において、上流からの洪水流とそれに伴う氾濫流を一体的に解析する手法として、RRI は最適なモデルである。また、モデルが構築できれば気候変動による水文量の変化に伴い洪水流や氾濫面積がどのように変化するかを予測することも可能となる。そこで、本研究では、三大河川流域の流出氾濫モデルを RRI を使って構築することとした。

5.3.2 RRI モデルの構築

(1) 三大河川のモデル化

三大河川の合流点は、河口のベンガル湾にほど近いバングラデシュ国内に位置する。本研究では、合流点から下流域、つまり河口に近い地域における洪水流や氾濫流は解析対象としていない。また、主記憶装置や中央演算処理装置など計算機資源の観点からも、三大河川流域を一つのモデルとして構築することは好ましくない。既往研究では、最も大きな流域でもインダス川の約 34 万 km² 程度（グリッドサイズは 1.7km×1.7km）である。三大河川流域

表 5.2 三大河川流域の RRI モデル諸元

モデル番号	流域	計算面積	グリッドサイズ	標高データ	降雨分布
G001	Ganges	942,913 km ²	60 秒 (896×544)	HydroSHEDS	GSMaP
B001	Brahmaputra	539,085 km ²	30 秒 (1184×734)	HydroSHEDS	GSMaP
M001	Meghna	85,214 km ²	15 秒 (1154×720)	HydroSHEDS	GSMaP

を合計すると、150 万 km² を超える計算面積となることから、計算資源を有効活用するためには、計算領域を小さくする、もしくはグリッドサイズを大きくするなどの工夫が必要である。よってまずは三大河川をそれぞれの河川流域でモデル化することとし、グリッドサイズは概ね 1000 × 1000 以下になるようにモデルを構築した。ガンジス川、ブラマプトラ川、メグナ川の RRI モデル諸元を表 5.2 および図 5.10 に示す。Ganges は 60 秒 (約 1,800m)、Brahmaputra は 30 秒 (約 900m)、Meghna は 15 秒 (約 450m) のグリッドサイズとした。

(2) 標高と河川データ

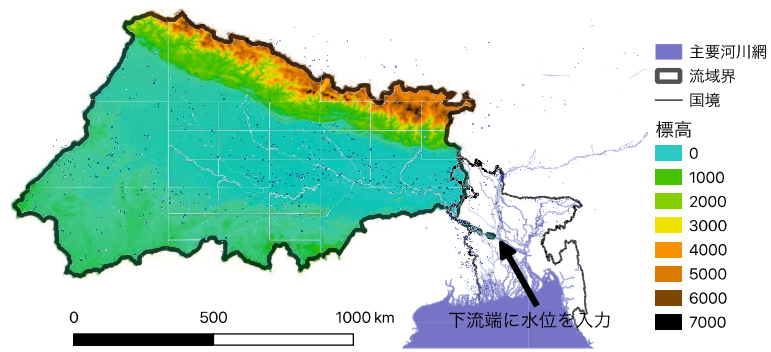
標高データには、HydroSHEDS に含まれる 15 秒地形データセットを基本に、M001 モデルではそのまま、G001 モデルでは 60 秒 (約 1,800m) に、B001 モデルでは 30 秒 (約 900m) にそれぞれ低分解能化して用いた。HydroSHEDS は標高 (DEM) ・落水方向 (DIR) ・集水面積 (ACC) を含み、DIR と ACC は、河道の接続関係と形状を規定するために用いた。

河川データについては、詳細な断面データを得ることができないときは、第一近似として河道幅 $W[m]$ と深さ $D[m]$ を、それぞれ河道式 (5.2) 式 (5.3) で算定することができる [113]。ここで A は集水面積 [km²] である。そのパラメータ (C_w, S_w, C_d, S_d) は、三大河川本川沿いの地形図や衛星画像を参考にしながら、それぞれ表 5.3 に示すとおりとした。なお、堤防高は三河川とも設定していない。

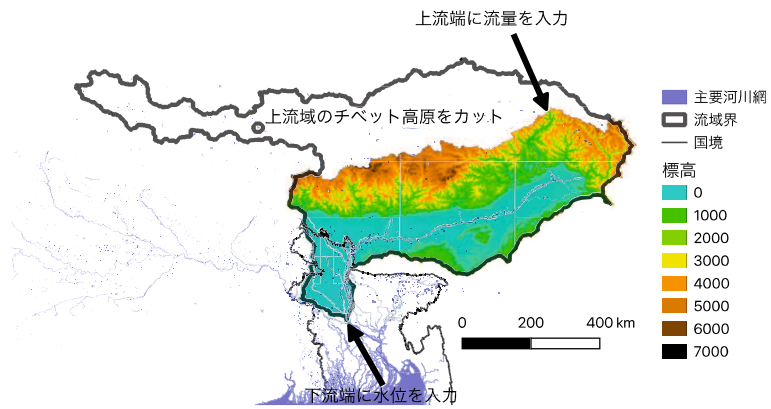
$$W = C_w A^{S_w} \quad (5.2)$$

$$D = C_d A^{S_d} \quad (5.3)$$

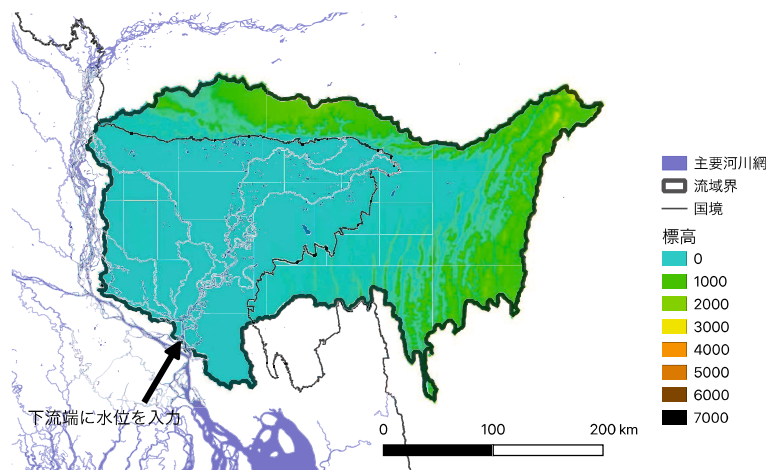
ここで、B001 モデルの最適化について説明する。ブラマプトラ川の上流域は少雨地帯のチベット高原に属する。チベット高原は、年間降水量は概ね 300mm 以下、かつ標高 5,000m を超えていて、降水量が雪となる範囲が大部分をしめることから、流出量に大きな影響を与えることは無いと考え、インドと中国の国境付近から上流域をカットし、計算領域から除外した。そのため、ブラマプトラ川本川の上流端には、解析する年の最小流量を与えた。また、RRI-GUI インターフェースの不具合から、上流域を含めたままモデルを構築するとアプリケーションが異常終了するというエラーが発生したため、暫定のエラー回避策として工夫したものである。本件については、RRI-GUI のバージョンアップを期待するものである。



(a) G001 モデル



(b) B001 モデル



(c) M001 モデル

図 5.10 三大河川の RRI モデル

表 5.3 三大河川の河川断面情報

モデル番号	C_w	S_w	C_d	S_d
G001	50.0	0.35	1.0	0.2
B001	100.0	0.35	0.1	0.2
M001	12.0	0.4	0.95	0.2

表 5.4 Green-Ampt 鉛直浸透パラメータ一覧 [129]

Soil texture class	k_v (m/s)	ϕ [gammaa]	S_f (m)
Sand	6.54E-05	0.437	0.0495
Loamy sand	1.66E-05	0.437	0.0613
Sandy loam	6.06E-06	0.453	0.1101
Loam	3.67E-06	0.463	0.0889
Silt loam	1.89E-06	0.501	0.1668
Sandy clay loam	8.33E-07	0.398	0.2185
Clay loam	5.56E-07	0.464	0.2088
Silty clay loam	5.56E-07	0.471	0.273
Sandy clay	3.33E-07	0.43	0.239
Silty clay	2.78E-07	0.479	0.2922
Clay	1.67E-07	0.475	0.3163

(3) 土地利用の反映

土地利用データと土壌データは RRI-GUI に実装されている GLCC-V2 を用い、Green-Ampt モデルを適用した鉛直浸透計算パラメータを設定した。設定値は RRI-GUI に組み込まれたデフォルトの値を用いている。表 5.4 に土壌データ毎のパラメータを示す。

(4) 再現計算ケース

バングラデシュ三大河川毎の流出氾濫解析において、近年の大洪水の水位流量および洪水氾濫を再現するために、表 5.5 に示す計算ケースを設定した。すべてのケースにおいて計算期間は 1 年間とした。境界条件の下流端へ水位情報入力は、それぞれのケースにおいて、それぞれのモデルにおける近傍の地点で観測された水位時系列を与えた。

G001 モデルでは流量比較を 1 地点、水位比較を 2 地点、氾濫域比較をインドとバングラデシュ国境付近に着目した。バングラデシュ国内のガンジス川流域は非常に狭く、本線に沿って細い幅で伸びているのみである。また、バングラデシュ国内にはガンジス川の支川流域が存在しないため、流量比較は 1 地点のみとした。

B001 モデルでは流量比較をブラマプトラ本川で 1 地点、支川の Dudhkumar 川、Dharla

表 5.5 再現計算ケースの設定

計算ケース	計算期間	流量比較地点	水位比較地点	氾濫比較対象
G001-2004	2004.1.1 ~ 12.31	SW90	SW90, SW88	国境付近
G001-2007	2007.1.1 ~ 12.31			
G001-2016	2016.1.1 ~ 12.31			
G001-2017	2017.1.1 ~ 12.31			
B001-2004	2004.1.1 ~ 12.31	SW46.9L, SW77, SW81, SW294	SW46.9L, SW49, SW77 SW81, SW294	国境から下流域
B001-2007	2007.1.1 ~ 12.31			
B001-2016	2016.1.1 ~ 12.31			
B001-2017	2017.1.1 ~ 12.31			
M001-2004	2004.1.1 ~ 12.31	SW175.5, SW228.5 SW267, SW269, SW273	SW175.5, SW228.5, SW267, SW269, SW273, SW225	全流域
M001-2007	2007.1.1 ~ 12.31			
M001-2016	2016.1.1 ~ 12.31			
M001-2017	2017.1.1 ~ 12.31			

川, Teesta 川でそれぞれ 1 地点ずつの合計 4 地点, 水位比較を流量比較地点に本川の 1 地点を追加した 5 地点, 氾濫域比較をバングラデシュ国内に着目した。

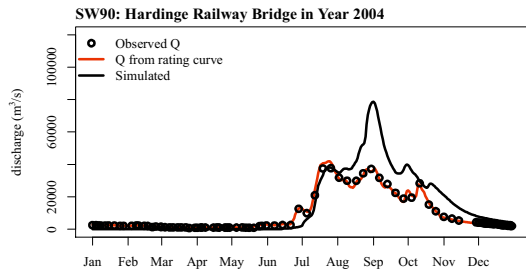
M001 モデルでは流量比較をメグナ本川で 1 地点, 支川の旧ブラマプトラ川, Surma 川, Kushiyara 川, ハオールでそれぞれ 1 地点ずつの合計 5 箇所, 水位比較を流量比較地点に旧ブラマプトラ川の 1 地点を追加した 6 地点, 氾濫域比較を全流域に着目した。

それぞれの地点の位置は, 図 5.6 に示すとおりである。

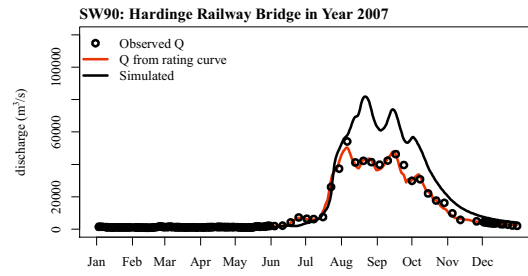
5.3.3 解析結果と考察

(1) G001 モデルの計算水位流量と実測水位流量の比較

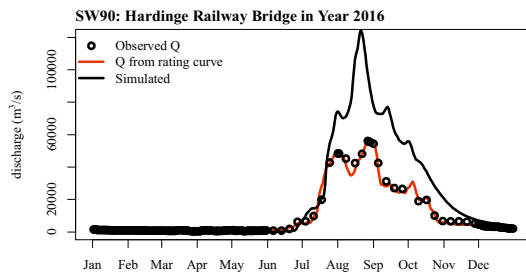
G001 モデルの計算流量と観測流量の比較を図 5.11 に, 計算水位と観測水位の比較を図 5.12 に示す。図 5.11 の黒丸マーカーは観測値, 赤実線は HQ 式で求めた流量時系列, 黒実線が計算値である。図 5.12 の赤実線は観測値, 黒実線が計算値である。また, 2017 年の観測値は 7 月までとなっているため 8 月以降の比較はできていない (以下, 解析結果と考察で示す比較図は同様の表記)。いずれの年も洪水の立ち上がりのタイミングと波形も概ね一致している。しかしながら, ピーク流量水位は計算値が実測値を大きく上回っており過大評価となり再現精度には問題がある。一方で, 計算水位流量ともハイドログラフの形状に注目すると, 降雨に伴うような短い周期のピークは見られず, ガンジス川の洪水は平滑化されて流下しバングラデシュに到達するという現象を概ね再現できた。ガンジス川にはファラッカ堰など複数の堰が存在するが, G001 モデルには組み込まれていない。乾季に堰で貯めていた水を洪水が来る前に放流するため, 計算値とのずれが生じるものとも考えることもできるが, その差分は堰での貯水量を考慮してもはるかに大きい。よって, 水位流量の差は堰の運用の



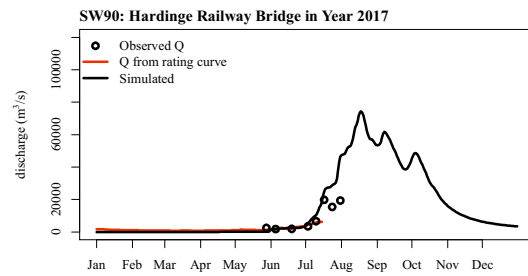
(a) SW90 in 2004



(b) SW90 in 2007

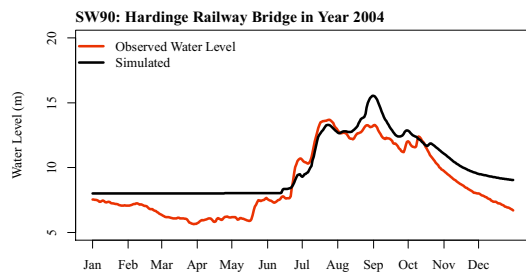


(c) SW90 in 2016

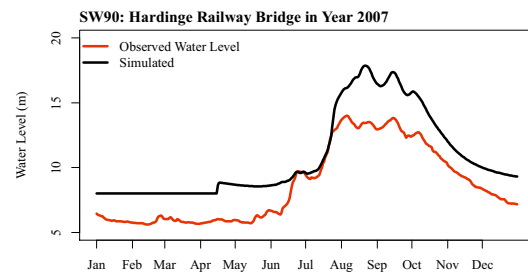


(d) SW90 in 2017

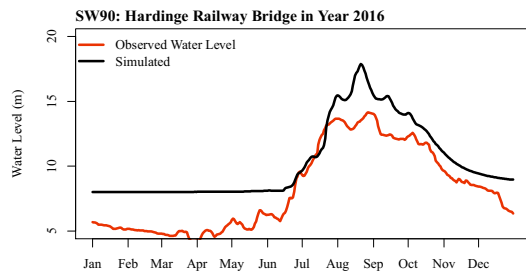
図 5.11 ガンジス川 SW90 地点の流量実測値と計算値の比較



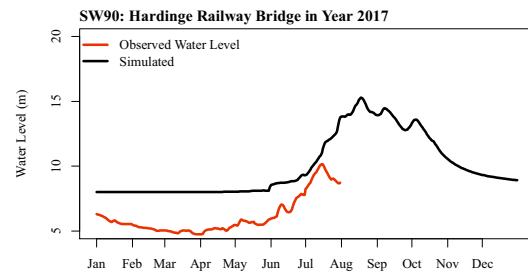
(a) SW90 in 2004



(b) SW90 in 2007



(c) SW90 in 2016



(d) SW90 in 2017

図 5.12 ガンジス川 SW90 地点の水位実測値と計算値の比較

影響ではなく、土地利用設定の際の green-ampt 鉛直浸透パラメータや河川断面情報の設定の影響であると考えられる。

ピーク流量の差が出現する原因は、G001 モデルで表現できていない分派河川の存在や、インド領内での水利用が理由としてあげられる。いずれの年の再現においてもその差は約 $20,000\text{m}^3/\text{s}$ となった。SW90 地点より上流では、ファラッカ堰から分流しコルカタを經由してベンガル湾に注ぐフーグリー川が、SW88 地点付近の Charghat でブラマプトラ川流域に向けて分流するバライ (Barai) 川がそれぞれ存在しており、これらの分派河川も差分を生み出しているものと考えられる。RRI モデルは、分派河川を表現できる機能があり、今後より詳細なモデルを構築する際に実装することで再現性を改善できる可能性がある。

これらの結果から、G001 モデルに関するバングラデシュの洪水の要因に関する考察では、氾濫域のみを考察することとした。

(2) B001 モデルの計算水位流量と実測水位流量の比較

B001 モデルの計算流量と観測流量の比較を図 5.13 に、計算水位と観測水位の比較を図 5.14 に示す。いずれの年も洪水の立ち上がりのタイミング、水位流量の上昇量、ピークともに一致している。2007 年、2017 年は洪水時も計算値と実測値はほとんど一致しており再現性は良好である。しかしながら、2004 年と 2016 年の洪水時の流量計算値が約 $50,000\text{m}^3/\text{s}$ 近く実測値よりも少なく、大幅な過小評価となっており再現精度に問題があった。水位についてみると、2004 年、2016 年の洪水時の実測値と計算値との差はさほどないように見えるが、ブラマプトラ川の河川断面は幅が 10km 以上、深さが 10m 以上（最深部は 40m 以上）あるため、1m 程度の水位上昇でも大きな流量増加となる。例えば 2016 年ピーク時の水位観測値と計算値の差は 1.181m である。2016 年の SW46.9L 地点の HQ 定数は、 $a = 3,365.834$ 、 $b = -15.0545$ で、式 (5.1) にあてはめて計算するとその差分は $40,266\text{m}^3/\text{s}$ となり、この程度の流量差が出現してもおかしくない。

次に、SW46.9L 地点の上流で北部から合流する 3 つの支川のそれぞれの地点での結果を考察する。SW77, SW81, SW294 地点ともに、すべての再現ケースで波形とピークは概ね一致している。SW294 では実測よりも再現計算の洪水の立ち上がりが遅れている傾向が見られるが、SW81 とともに 2016 年の観測流量と計算流量は概ね一致している。2016 年以外のケースについては、SW77, SW81 とともに洪水時の計算流量は観測流量よりも少なく再現されており過少評価である。北部から合流する 3 つの支川の上流域は標高 4,000m 以上のヒマラヤ山脈が連なり、雨季の融雪出水量が観測値と計算値の差を生み出す原因として考えられる。バングラデシュとインドとの国境より上流の水位流量観測値が入手できていないため、融雪出水量が明確な原因であると結論づけることはできないが、国境より上流のインドやブータンから無数の支川がブラマプトラ川本川に合流していることから、再現計算に対して融雪出水を考慮する必要がある、再現精度を改善するための一つの方法として今後の検討する必要がある。

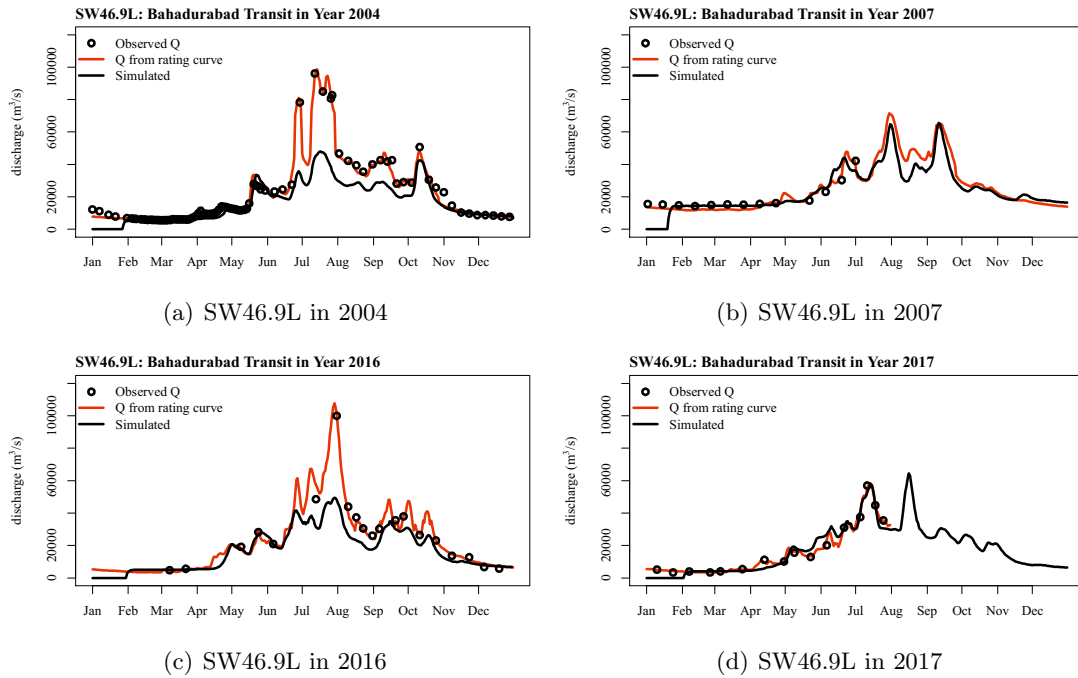


図 5.13 ブラマプトラ川 SW46.9L 地点の流量実測値と計算値の比較

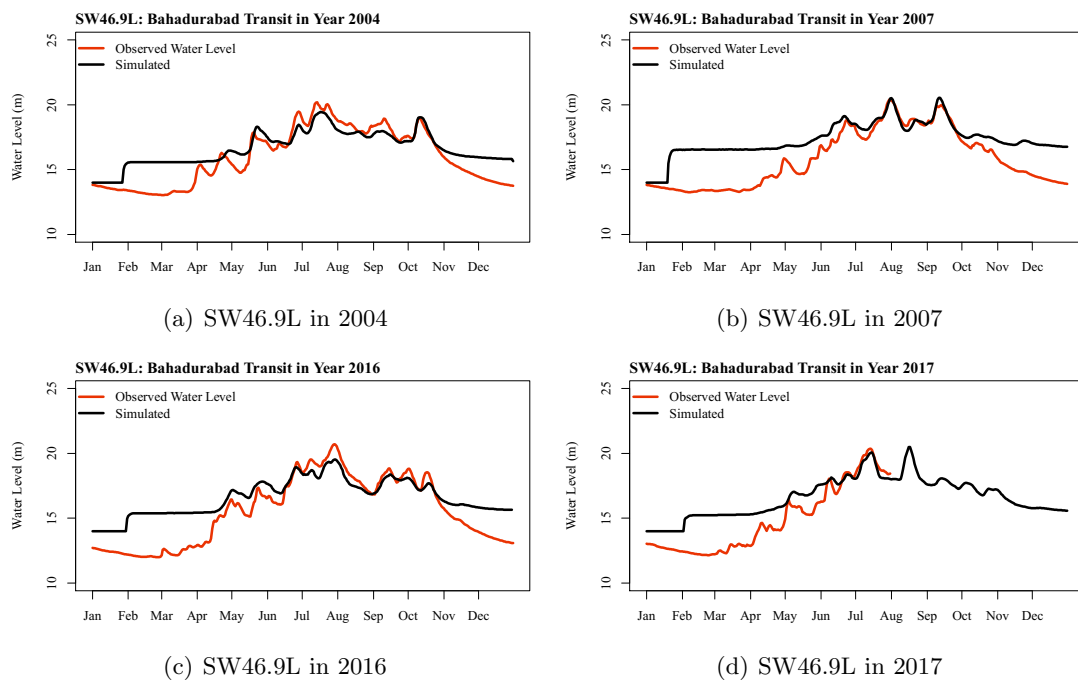


図 5.14 ブラマプトラ川 SW46.9L 地点の水位実測値と計算値の比較

SW49 地点は流量観測が実施されていないため、水位のみ比較対象とした。SW49 地点はブラマプトラ川にかかる唯一の橋梁（ボンゴボンドゥ橋：4.7km）の上流に位置しており、架橋のためにブラマプトラ川の川幅を無理やり狭めている地点（Sirajiganj hardpoint と呼ばれる）にある。ここでの観測水位と計算水位の比較をみると、すべてのケースにおいて過小評価となっている。これは、河道断面情報を式 (5.1) で一律に設定したために、実際の川幅の長短が表現できておらず、実際の水面形である狭窄部に伴う水位上昇が表現できていないことから差が生じたものと推察される。

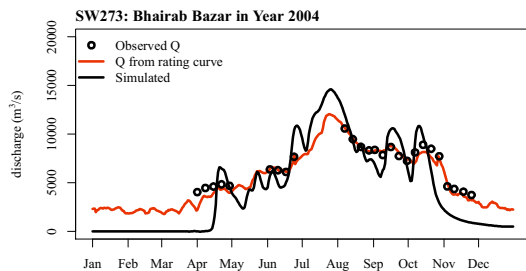
なお、B001 モデルの支川地点における計算流量と観測流量の比較ハイドログラフは、図 A.2～図 A.4 に、水位については、図 A.12～図 A.15 にまとめて示した。

(3) M001 モデルの計算流量と実測流量の比較

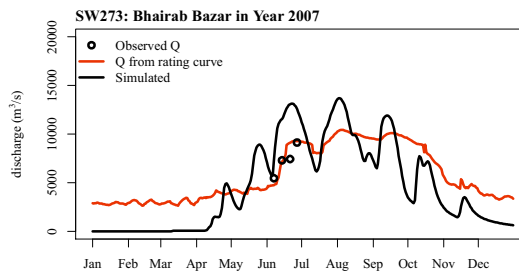
M001 モデルの計算流量と観測流量の比較を図 5.15、図 5.17 に、計算水位と観測水位の比較を図 5.16、図 5.18 にそれぞれ示す。M001 モデルについては、2016 年、2017 年の観測水位は入手できなかったため、比較図は作成していない。SW273 地点の計算流量は、いずれのケースにおいても一つの大きな波、つまり平均値としてみると観測流量と概ね一致しているものの、ハオールで氾濫水が貯留することによる流量の平滑化は再現性が良好でない。さらに、水位についても観測水位、計算水位とも、波形、ピークともに再現精度は良好でなかった。メグナ川は河床勾配が非常に小さく、バングラデシュ国内はほぼフラットであり複雑な河川網となっているため、干満や本支川の水位差が相互にかつ複雑に影響しており、なおかつ大規模な氾濫が発生するため、モデルのパラメータ設定が非常に複雑となる。よって、M001 モデルでの再現計算は膨大な計算資源と実行時間を要する。また、地点によってはバックウォーターの影響も長距離に及んでいるため、この流域の複雑な水理現象を確認するためには、aDcp 流速計等を現地に設置し、連続観測することが望まれる。

SW273 地点からさらに上流に位置するハオールの代表 SW269 地点においても同様の結果となっており、メグナ川流域が非常にフラットであることから、巨大な窪地ハオールへの氾濫、貯水効果等の複雑な水理現象が存在することが見てとれる。なお、SW269 地点の水位の再現計算についてはいずれのケースも過大評価となった。これはメグナ川の河道断面をより詳細に設定することで改善できる可能性がある。

このほか、さらに上流に位置する SW267 地点、支川の Kushiya 川の SW175.5 地点、ブラマプトラ川から分流する旧ブラマプトラ川の SW228.5 地点について考察する。いずれのケースも SW175.5 地点では過大評価であったのに対して、SW267 地点では過小評価となった。これには 2 つの理由が考えられる、まず第一に、SW267 地点の近傍にはメガラヤ山地のチェラプンジーやモウシンラムを含む世界有数の豪雨地域があり、GSMP がローカルスケールでの豪雨を表現できていないことが原因の一つとも推測される。第二に、本川のインドとの国境に北側と南側に分流する地点が存在しており、B001 モデルではこの分流がモデルに組み込まれておらず、インドから流れ込んだ河川水はすべて南側のクシヤラ川を流れる

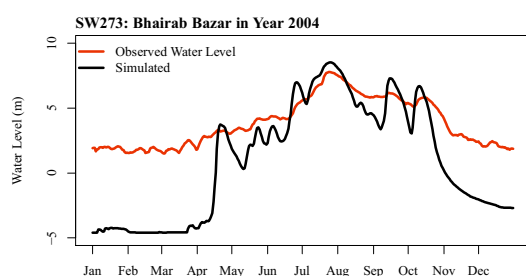


(a) SW273 in 2004

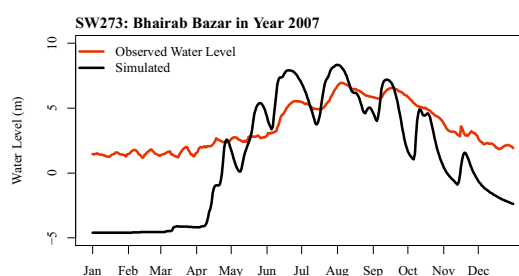


(b) SW273 in 2007

図 5.15 メグナ川 SW273 地点の流量実測値と計算値の比較



(a) SW273 in 2004



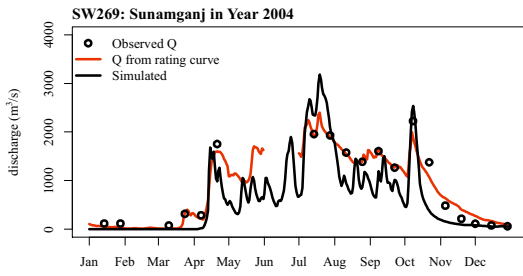
(b) SW273 in 2007

図 5.16 メグナ川 SW273 地点の水位実測値と計算値の比較

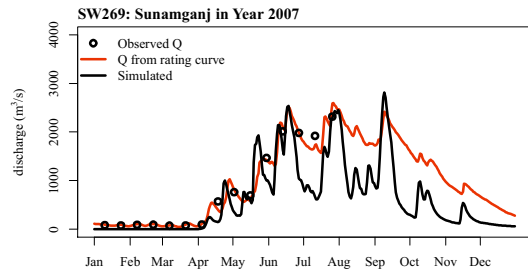
ように計算される。よって南側のクシヤラ川に位置する SW175.5 地点が過大評価で北側のスルマ川に位置する SW267 地点が過小評価となるのは妥当な結果である。これらは RRI の分派河川を表現できる機能をモデルに組み込むことにより改善可能と考えられる。

SW228.5 地点では水位流量とも計算値と観測値が全く一致しない結果となった。観測流量と計算流量の差は、約 $2,000\text{m}^2/\text{s}$ から $3,000\text{m}^2/\text{s}$ に達し、大幅な過少評価である。これは、ブラマプトラ川の SW46.9L 地点の上流左岸から旧ブラマプトラ川が分流するため、その現象が RRI モデルに組み込まれていないことが原因であることは明らかである。SW228.5 地点の上流に位置する SW225 地点の計算水位と観測水位を比較しても同じことが言える。以上の明らかになったことから、M001 モデルで再現計算することにより、ブラマプトラ川から分岐する旧ブラマプトラ川に対し、4つのケースで洪水時には最大約 $3,000\text{m}^2/\text{s}$ の分流があることが確認できた。

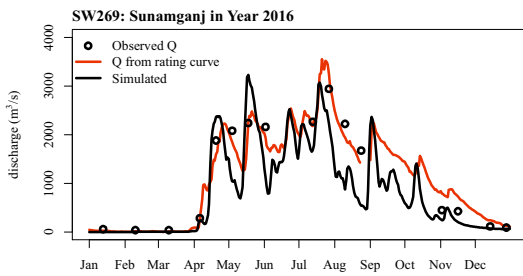
なお、M001 モデルの支川地点における計算流量と観測流量の比較ハイドログラフは、図 A.7～図 A.10 に、水位については、図 A.19～図 A.23 にまとめて示した。



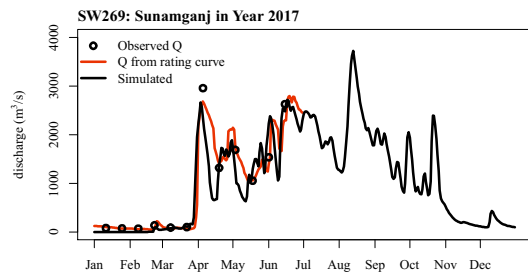
(a) SW269 in 2004



(b) SW269 in 2007

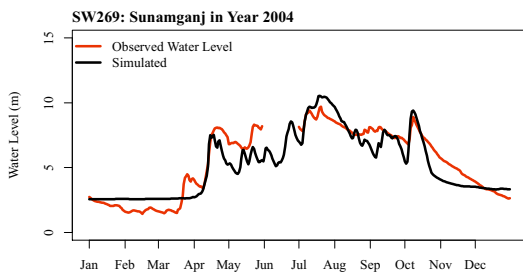


(c) SW269 in 2016

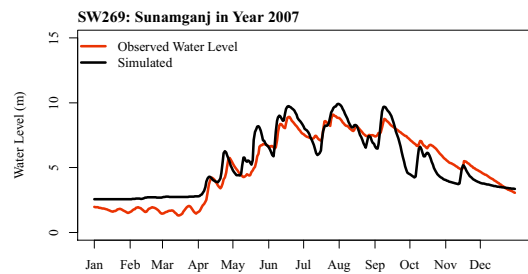


(d) SW269 in 2017

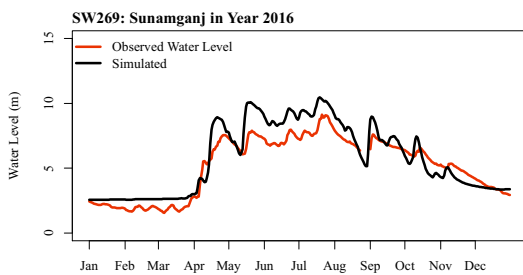
図 5.17 Haor (ハオール) SW269 地点の流量実測値と計算値の比較



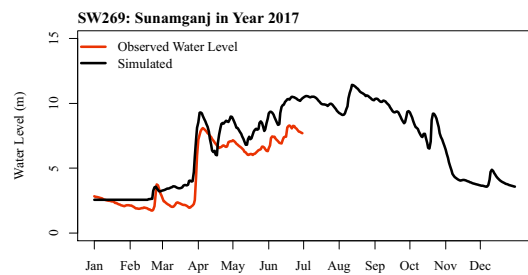
(a) SW269 in 2004



(b) SW269 in 2007



(c) SW269 in 2016



(d) SW269 in 2017

図 5.18 Haor (ハオール) SW269 地点の水位実測値と計算値の比較

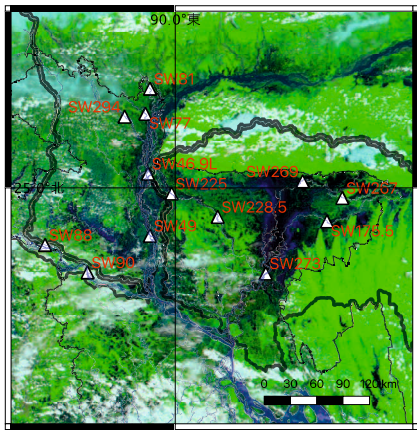
(4) 氾濫域の比較

2007年8月3日, 2017年9月6日の洪水をバングラデシュ全域, 2016年8月30日, 2017年4月8日の洪水をメグナ川流域のハオールにそれぞれ着目し, RRIモデルによって得られたシミュレーション結果と衛星画像に基づく浸水範囲を比較した。いずれも洪水による被害が発生したことから, 衛星画像 (MODIS) による記録が残っており, これらをシミュレーション結果との比較に利用した。また, 三大河川をそれぞれのモデルで計算しているが, 計算結果はまとめて図示した。それぞれのモデルでグリッド間隔の違いがあることから, 例えばガンジス川流域の結果は他の流域に比較して若干精細さに欠ける表現となっている。

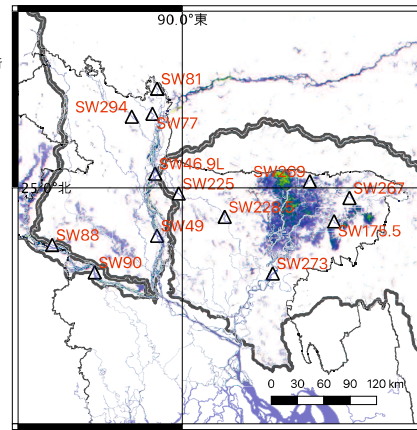
2007年8月3日と2017年9月6日の浸水実績とシミュレーション結果の比較を, それぞれ図 5.19, 図 5.20 に示す。どちらの再現結果も浸水範囲は概ね一致しており, 再現性は良好と言える。特にメグナ川流域のハオール周辺から東側の氾濫域, ブラマプトラ川流域で SW49 地点の東方で北西に伸びる支川沿いの氾濫域, SW49 地点の北西部の氾濫域, ガンジス川流域で SW88 地点の北西のインド領内に 2 つに伸びる氾濫域については概ね良好に再現した。一方, 衛星画像では確認できるメグナ川流域の旧ブラマプトラ川沿いに点在する氾濫域, SW49 地点の南東側の氾濫域, ブラマプトラ川流域の SW46.9L 地点の西側に広がる氾濫域についてはシミュレーションで再現できなかった。これらはブラマプトラ川からメグナ川流域に分流する河川をモデルに表現できていないためである。ブラマプトラ川からメグナ川流域に分流する河川は, 旧ブラマプトラ川以外にも SW49 地点から下流に 3 河川 (Bongshai 川, Dhaleshwari 川, Kaliganga 川) が存在する。参考までに, そのうちの Bongshai 川の分流部で 2015 年 8 月 20 日に aDcp で流量観測した際には, ブラマプトラ川から約 $800\text{m}^3/\text{s}$ の分流量を確認した。また, SW46.9L 地点の西側に広がる氾濫域は, 河川侵食による堤防決壊が原因で氾濫しているものである。ブラマプトラ川右岸のこの付近のは河川侵食がもっとも激しく, 一晩で 200m の幅が侵食され土地が消失する例も報告されている。バングラデシュの堤防決壊は, そのほとんどが河川侵食により河岸の安定性が失われて円弧すべりで発生するものであることが, 現地調査と解析により明らかになっている [130]。RRI モデルは河床変動や側方侵食に伴う堤防決壊を計算をする機能がないため, 堤防高の設定などで工夫する必要がある。中尾 [95] は, ブラマプトラ川の左岸から越水して広範囲に広がるのはバハドラバード地点での流量が $50,000\text{m}^3/\text{s}$ を超えた場合であること, ブラマプトラ川の流量の大きさによって洪水氾濫規模がほとんど決定される, ということを既往研究で示しているが, これを RRI モデルで確認するためには, ブラマプトラ川とメグナ川を一体化し, 分派河川や堤防決壊を表現する機能を実装したモデルを構築することが課題となる。

なお, 2 つのケースを比較すると, 2007 年はメグナ川よりもブラマプトラ川流域の氾濫域が広く, 2017 年はブラマプトラ川よりもメグナ川流域の氾濫域が広いことが衛星画像からもシミュレーション結果からも見て取れる。これらは GSMaP の降雨分布からも妥当な結果であることが確認できる。

次に, 2016 年 8 月 30 日と 2017 年 4 月 8 日の浸水実績とシミュレーション結果の比較を

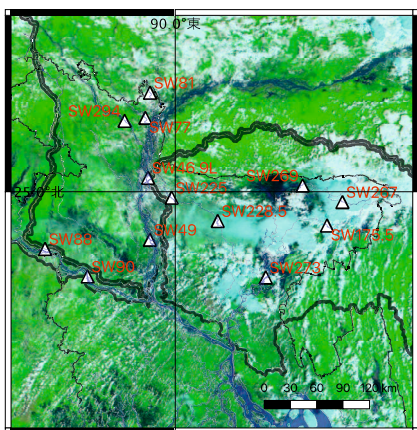


(a) 衛星画像 (MODIS) による浸水区域

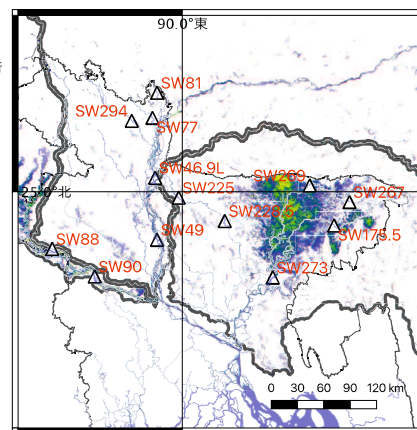


(b) シミュレーションによる浸水区域

図 5.19 2007 年 8 月 3 日の衛星画像に基づく浸水区域と RRI 再現計算による浸水区域



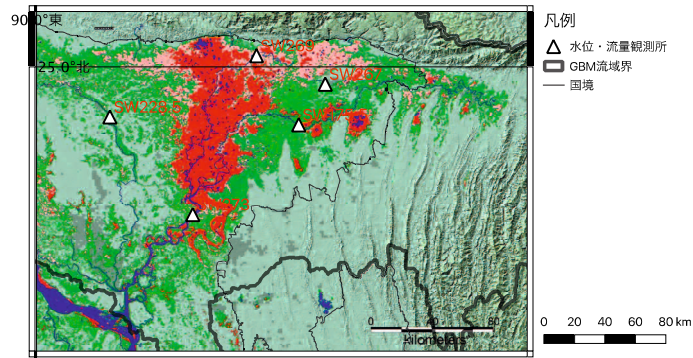
(a) 衛星画像 (MODIS) による浸水区域



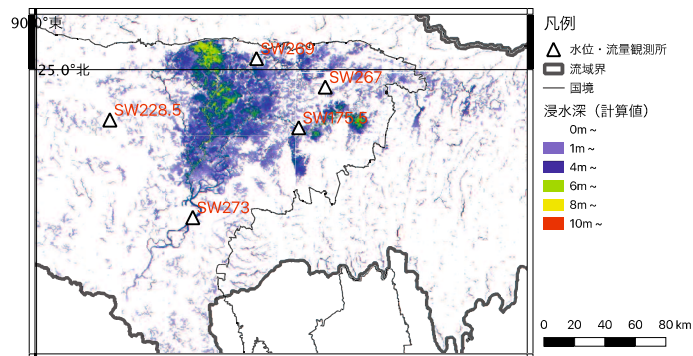
(b) シミュレーションによる浸水区域

図 5.20 2017 年 9 月 6 日の衛星画像に基づく浸水区域と RRI 再現計算による浸水区域

それぞれ図 5.21, 図 5.22 に示す. 図 5.21 の赤色区域は浸水域, ピンク色区域はその年の最大浸水区域である. 図 5.22 の赤色区域は浸水域, 青色は既往の浸水区域, 水色は通年の水域を示している. シミュレーション結果と比較すると, 2016 年のケースでは SW273 地点の東側に蛇行するように広がる浸水域が再現できていないこと, SW175.5 地点の南に広がる浸水域が過大評価であることの 2 点以外については, どちらのケースも浸水範囲はほぼ一致しており非常に良い再現性を示した. SW175.5 地点の過大な再現は, 水位流量の結果とも一致している. 2017 年 4 月 8 日のこの時期は通常では乾季の終わりにあたり, 洪水氾濫が発生することはこれまで経験がなく, 季節外れの異常洪水による氾濫である. このときはハオールに実った収穫直前の稲が全滅となり, 洪水により甚大な農作物の被害を受けたことが報告された. RRI モデルで氾濫域を再現できたことで, 数週間前から大雨が予測できれば, RRI モデルをつかったリアルタイム氾濫予測システムで予測が可能となり, 農作物被害軽減にも貢献できる.

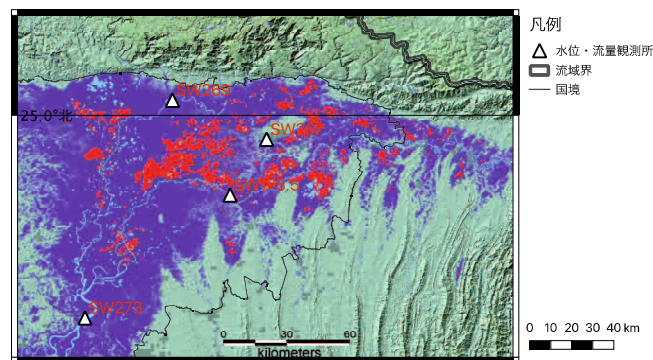


(a) 衛星画像 (MODIS) による浸水区域

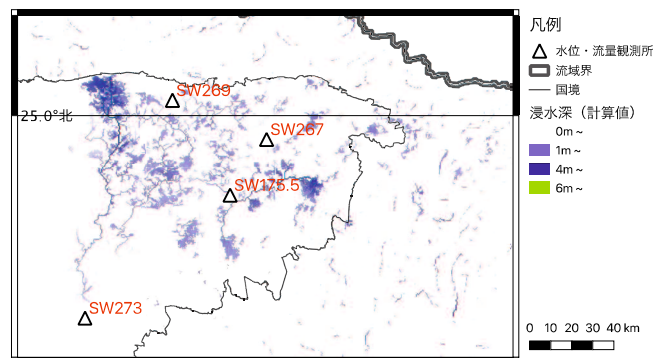


(b) シミュレーションによる浸水区域

図 5.21 2016 年 8 月 30 日の衛星画像に基づく浸水区域と RRI 再現計算による浸水区域



(a) 衛星画像 (MODIS) による浸水区域



(b) シミュレーションによる浸水区域

図 5.22 2017 年 4 月 8 日の衛星画像に基づく浸水区域と RRI 再現計算による浸水区域

表 5.6 三大河川流域の RRI モデル改善事項

モデル番号	河川断面	降雨情報	土地利用	その他
G001	実態に即した河川断面設定	TRMM, APHRODITE, d4PDF との比較	パラメータの調整	融雪出水考慮
B001	実態に即した河川断面設定	TRMM, APHRODITE, d4PDF との比較	パラメータの調整	融雪出水考慮, M001 モデルとの結合, 分流河川の設定
M001	実態に即した河川断面設定	TRMM, APHRODITE, d4PDF との比較	パラメータの調整	B001 モデルとの結合, SW273 地点の連続流量観測

5.3.4 モデルの改善

RRI モデルの各ケースによる再現計算と実績値比較の考察結果から、モデルの改善すべき事項を表 5.6 にまとめて示し、今後の課題とする。RRI モデルは任意の河川断面形状を直接反映することができるため、より詳細な設定をおこなうことで、水位流量の再現性や、考察では述べなかった氾濫における浸水深も改善できる可能性が十分にある。

また、プログラムの実行時間はグリッドサイズだけでなく、氾濫の規模によって大きく左右される。例えば、B001 モデルは半日程度で計算完了するが、M001 モデルは年間の氾濫期間が長く浸水深も深いため、計算完了までに 14 日程度を要する。RRI は OpenMPI を使って並列化されているが、4 スレッド以上になると並列化効率が頭打ちとなることも明らかになった。このことは本論文では詳しく述べないが、入力データの最適化や CUDA Fortran で GPU コード化するなどのプログラムのチューニングを行うことにより、より高速な実行を実現できると思われる。

先に述べたとおり、RRI-GUI のエラーにより構築したプロジェクトファイルを読み込むことができなかつたため、止むを得ず Linux の Intel Fortran を使ってプログラムを再コンパイルし実行することができた。その際、同じハードウェアアーキテクチャでも、Windows10 より Linux のほうが実行時間が約半分程度短くなる、つまり約 2 倍高速になることが明らかになっている。また、RRI は斜面の二次元地中流・表面波モデルの浅水方程式の拡散波近似における q_x , q_y の計算で、べき乗演算が出現するため、ここの繰り返し計算にもっとも大きな負荷がかかり、べき乗演算が実行時間の約 60% を占めることも、Linux での実行の過程で明らかになっている。

5.4 水災害の要因と将来予測

5.4.1 降水量の地域特性と流出への影響

中尾^[95]は、バングラデシュの治水計画に関する研究の中で、流域の降水量の比率ではバングラデシュ国内が全流域の9%となり、洪水氾濫のうち国内の降雨に起因する部分が多い、と述べている。本項では、比較的再現性が良好であった各モデルの2007年の計算結果を用いて、バングラデシュ三大河川の洪水氾濫の要因を考察した。

図5.23は、G001モデルの2007年の再現計算結果である最大浸水区域を示したものである。ガンジス川のバングラデシュ国内の流域は黒点線で囲った部分のわずかな部分であり、バングラデシュ国内の流域に浸水区域はみられない。よって、ガンジス川の洪水は、ブラマプトラ川の出発水位に影響する以外、洪水氾濫に対し直接的な影響は少ないといえる。ただし、今回計算の対象としなかったデルタ地帯は別途検討する必要がある。

図5.24は、B001モデルの2007年の再現計算結果である洪水ピーク時の流量を示したものである。ブラマプトラ川は、インドとの国境に本川地点と4つの支川の地点が存在する。それぞれの流入地点の合計流量と、SW46.9L地点の流量を比較すると、その差はわずか $252\text{m}^3/\text{s}$ となる。したがって、バングラデシュ国内のブラマプトラ川による洪水氾濫は、そのほとんどがインドからの流入によると言える。また、衛星画像でSW46.9L地点の右岸側に見られる浸水域とSW49地点の下流左岸側に分流する派川に沿った浸水域は、バングラデシュ国内の降雨は直接的に影響しない。一方、ブラマプトラ川の最下流に合流する北西に伸びるGumani川流域はバングラデシュ国内で閉じていることから、その浸水域はバングラデシュ国内の降雨による直接的な影響であることが、B001モデルの再現結果からも明らかである。

メグナ川については、年間降水量の多い地域がバングラデシュ国内に集中している。よって、バングラデシュ東北部の洪水氾濫は、国内の降雨に起因していることがM001モデルの再現結果からも明らかである。さらには、インドから流入する支川が23河川にも及び、その代表であるスルマ川の国境地点では、最大約 $8,000\text{m}^3/\text{s}$ の計算流量が再現された。このことから、メグナ側の洪水氾濫は、バングラデシュ国内の降雨のみならず、インド国境から流れ込む洪水も大きな要因となっていることをM001モデルの計算結果から明らかすることができた。

5.4.2 降水量の長期変化傾向を反映した流出量の将来予測

第3章では、ベンガル地域の気象水文量の長期変化について本地域の傾向を明らかにした。その結果と構築したRRIモデルを用いて100年後の流出量や氾濫面積がどのように変化するかを計算した。ブラマプトラ川流域については水位流量の変化を、メグナ川流域については浸水深と氾濫域の変化に着目する。

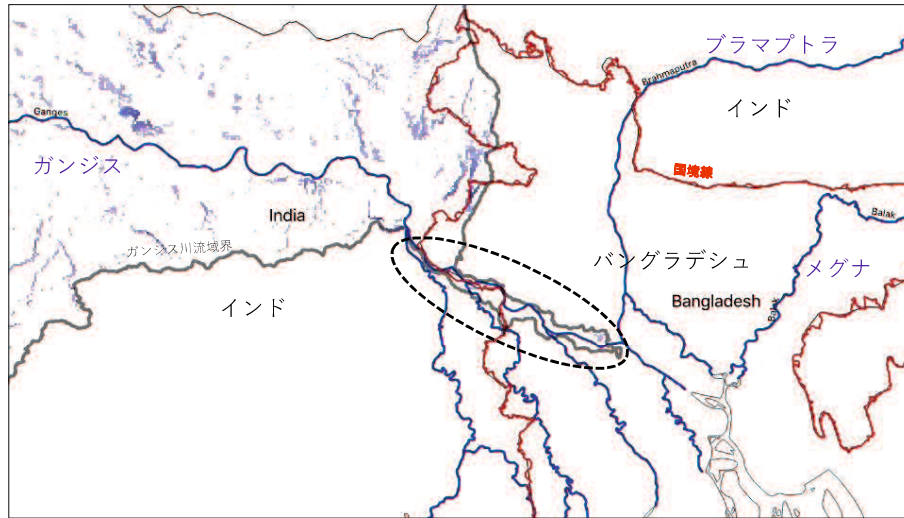


図 5.23 G001 モデルの 2007 年の計算結果（最大浸水区域）

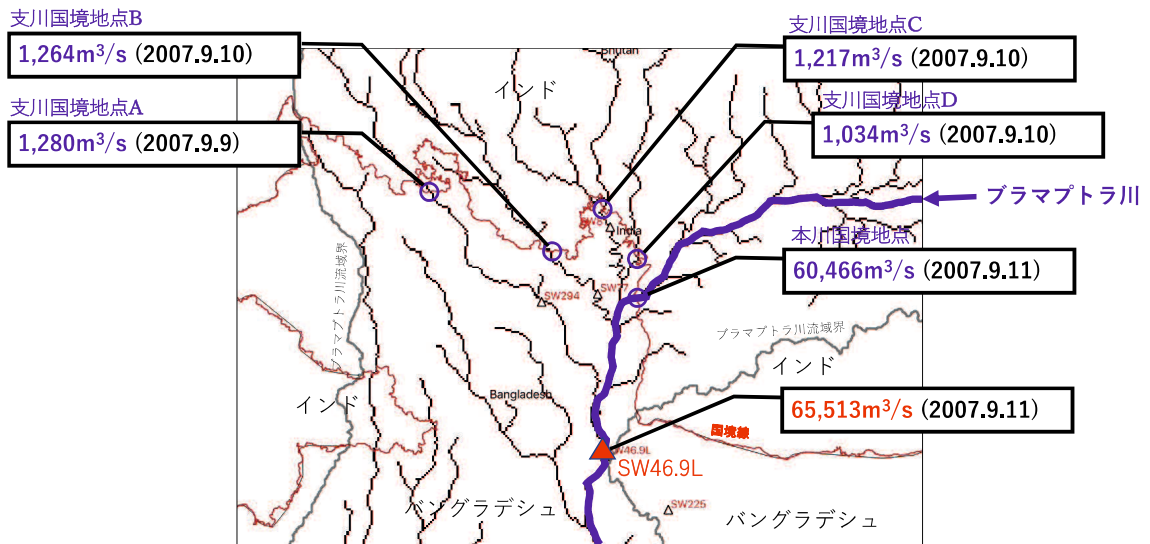


図 5.24 B001 モデルの 2007 年の計算結果（洪水ピーク時流量）

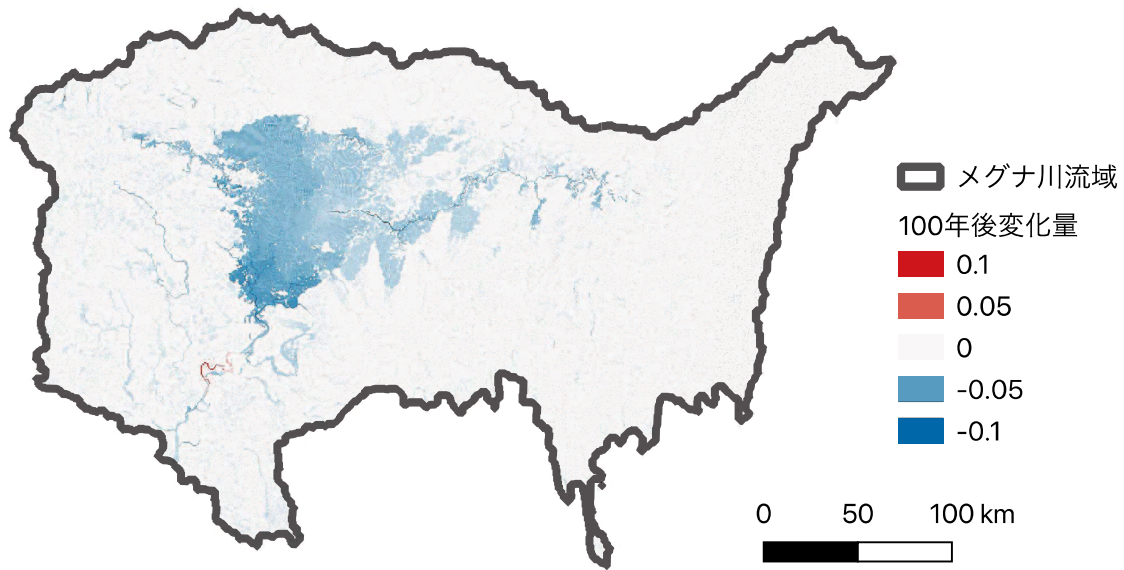


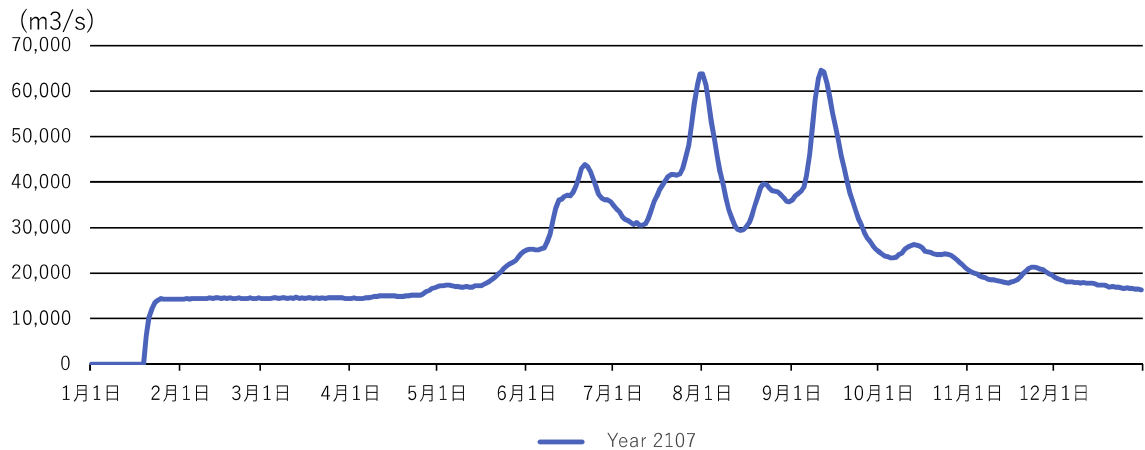
図 5.25 100 年後のメグナ川流域浸水深の変化

比較的再現性の高かった 2007 年のケースを基準とし、第 3 章で明らかにした増減傾向が 100 年後も同傾向であると仮定し、ブラマプトラ川流域は、Assam Megaraya 地域の Sens.Slope の値 (-0.0927/月) を用いて、2007 年の GSMaP 年間降水量から 100 年後の年間降水量を計算しその比率を求めた。次にその比率を 2007 年の GSMaP の時系列データの各グリッド値に乘じ、RRI モデルに入力する降雨データとした。同様にメグナ川流域は、Sylhet の Sens.Slope の値 (-0.115/月) を用いた。

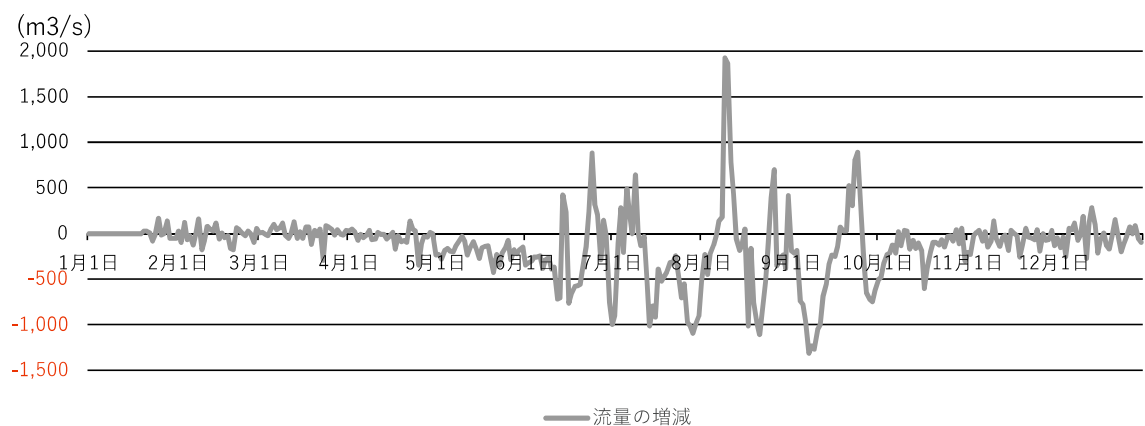
メグナ川流域の 100 年後の浸水深と氾濫面積の変化を図 5.25 に示す。青色が減少、赤色が増加を表す。氾濫域はほとんど変化がないが、ハオールの水位は最大で 10cm 減少する結果となった。また、その減少量は下流ほど大きい。さらにメグナ川の下流においては 10cm 程度の水位上昇が見られる区間も存在する。100 年後の降水量の比率は現在の約 98%程度でわずかな減少に見えるが、10cm の水位減少は、総流出量に大きく影響することがわかる。洪水氾濫に対するリスクはさほど変化はないが、一方で水利用に関するリスクが予測され、水資源管理の再検討が必要になると考えられる。

ブラマプトラ川の 100 年後の水位流量変化を図 5.26 に示す。雨季に増減が見られ、最大で $2,000\text{m}^3/\text{s}$ の増、 $1,300\text{m}^3/\text{s}$ の減が見られるが、平均すると流量は $131.51\text{m}^3/\text{s}$ の減少となった。ブラマプトラ川については、洪水氾濫リスクはさほど大きく変化するものではないと考えられる。

本項では、降水量が単調減少することを前提条件としているため、大雨など激しい気象現象が増加していることを考慮すると、今後は確率論を取り入れてリスク予測することが必要であろう。



(a) 100年後（2107年）の流量



(b) 流量の変化

図 5.26 100年後のブラマプトラ川 SW46.9L 地点の流量変化

5.5 おわりに

本章では、バングラデシュの過去の4ケースの洪水氾濫について、流出と氾濫を一体的に解析できる RRI モデルを用いて再現し、観測値と比較することによって、バングラデシュ国内河川の水位および流量、そして、洪水氾濫の特徴を総合的に考察した。また、前章で明らかになった結果を用いて、ブラマプトラ川、メグナ川流域の水位および流量、洪水氾濫の変化を予測した。

本研究で得られた結果および明らかになった事項を以下にまとめる。

- 1) 三大河川のそれぞれの流域の RRI モデルを構築し、流出解析と氾濫解析を一体的に実施した。特に、ガンジス川、ブラマプトラ川については、既往最大の面積の RRI モデルを構築できた。
- 2) ブラマプトラ川のような幅 10km 近い大河川の流出氾濫モデルは過去に例がなく、本研究ではじめて構築したとともに、2007年、2016年については、流出解析、氾濫解析とも

に概ね妥当な再現結果を得ることができた。一方で、流量が $100,000\text{m}^3/\text{s}$ を超えるような年、2004年、2017年の再現精度には課題があることが明らかになった。

- 3) メグナ川は、非常にフラットで中央部に広大な窪地が存在し、かつ複雑な河川ネットワークを有する流域であるが、RRIモデルの再現結果は、洪水氾濫域について概ね妥当な再現結果を得ることができた。
- 4) ブラマプトラ川からメグナ川流域に分派する河川の影響について、メグナ川流域モデルの再現結果から推察することができた。ブラマプトラ川とメグナ川流域を一体化したモデルを構築し、分流機能を実装することでより高い再現性をもったモデルを構築できると考えられる。
- 5) ガンジス川の洪水は、バングラデシュ国内の氾濫に対し、直接の影響は少ないことが、RRIモデル再現結果から確認できた。
- 6) バングラデシュ国内のブラマプトラ川の影響による洪水氾濫は、そのほとんどがインドからの流入によることが、RRIモデル再現結果から確認できた。
- 7) ベンガル地域において、現在までの気象・水文量の変化傾向が継続すると仮定すると、メグナ川流域では最大10cmの水位低下、下流では10cmの水位上昇が発生することが明らかになった。また、ブラマプトラ川の流量は平均で約 $130\text{m}^3/\text{s}$ 程度の減少が予想される。洪水リスクについてはさほど大きく変化するものではないが、一方で水利用のリスクが新たに発生するものと考えられる。

参考文献

- [92] Netherlands Development Cooperation: Flood action plan, *Bangladesh, Evaluation Report*, 1993.
- [93] 佐山敬洋, 岩見洋一: 降雨流出氾濫 (RRI) モデルの開発と応用, 土木技術資料 56-6, pp. 18-21, 2014.
- [94] 岡太郎: バングラデシュの洪水災害, 京都大学防災研究所年報, 第47号A, pp. 59-80, 2004.
- [95] 中尾忠彦: バングラデシュの治水計画に関する研究, 東京大学学位論文, 1997.
- [96] Mondal, M. S., Islam, M. R. and Biswas, S.: Simulation of flood risk due to climate change in major rivers of Bangladesh using a hydrodynamic model, *Proceedings, International Conference on Disaster Risk Mitigation, Dhaka, Bangladesh, September 23-24, 2017*.

- [97] 熬天其, 石平博, 竹内邦良: ブロック型 TOPMODEL 及び M-C 追跡法による分布型流出解析モデルの検討, *水工学論文集*, Vol.43, pp.7-12, 1999.
- [98] Islam M. K., Gusyev, M., Kwak, Y. and Takeuchi, K.: Importance of distributed hydrological model for flood management in Bangladesh, *土木学会第 69 回学術講演会*, pp.55-56, 2014.
- [99] G.M. Munna, M. J. B. Alam, M. M. Uddin and M. T. Rahman: Flood hazard mapping of Surma river in Sylhet city, *Tech. J. River Res. Inst.*, 14(1), pp.22-28, 2018.
- [100] 橋本雅和, 川池健司, 出口知敬: バングラデシュ・ガイバンダにおけるネスティングモデルを用いたハザードマップの作成, *京都大学防災研究所年報*, 第 59 号 B, pp.405-410, 2016.
- [101] 若月泰孝, 中村要介, 阿部紫織, 佐山敬洋: 高解像 RCM 実験の情報を用いたハイブリッドダウンスケーリングと降雨流出氾濫モデルによる河川水位の評価, *日本地球惑星科学連合 2018 年大会*, 2018.
- [102] Try, S., Tanaka, S., Tanaka, K., Sayama, T., Oeurng, C., Uk, S., Takara, K., Hu, M. and Han, D.: Comparison of gridded precipitation datasets for rainfall-runoff and inundation modeling in the Mekong River Basin, *PLOS ONE (2020)*, 15(1), 2020.
- [103] 山本浩大, 佐山敬洋, 近者敦彦, 中村要介, 三宅慎太郎, 寶 馨: 千種川流域を対象にした RRI モデルによる降雨流出・洪水氾濫統合型解析, *自然災害科学 J. JSNDS*, No.36 特別号, pp. 139-151, 2017.
- [104] 重枝未玲, 秋山壽一郎, 大久保剛貴, 中島晴紀: 平成 29 年 7 月九州北部豪雨時の花月川流域の流域流出・洪水氾濫解析, *河川技術論文集*, 第 24 巻, pp.451-456, 2018.
- [105] 栗林大輔, 大原美保, 佐山敬洋, 近者敦彦, 澤野久弥: 氾濫解析モデルを用いた地区レベルの洪水脆弱性把握手法の提案, *地域安全学会梗概集*, No.38, pp.171-174, 2016.
- [106] 国土交通省水管理・国土保全局河川環境課水防企画室・国土技術政策総合研究所河川研究部水害研究室: 小規模河川の氾濫推定図作成の手引き, *国土交通省*, 2020.
- [107] 佐山敬洋, 建部祐哉, 藤岡 奨, 牛山朋來, 萬屋敦啓, 田中茂信: 2011 年タイ洪水を対象にした緊急対応の降雨流出氾濫予測: *土木学会論文集 B1(水工学)*, Vol.69, No.1, pp.14-29, 2011.
- [108] Sayama, T., Tatebe, Y., Iwami, Y. and Tanaka, S.: Hydrologic sensitivity of flood runoff and inundation: 2011 Thailand floods in the Chao Phraya River basin, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, No.15, pp. 1617-1630, 2015.

- [109] 独立行政法人国際協力機構（JICA）：タイ王国チャオプラヤ川流域洪水対策プロジェクト最終報告書，独立行政法人国際協力機構（JICA），2013.
- [110] Perera E. D. P., Sayama T., Magome J., Hasegawa A. and Iwami Y.: RCP8.5-Based Future Flood Hazard Analysis for the Lower Mekong River Basin, *Hydrology*, Vol. 55, 2017.
- [111] Sindhu K. and Durga Rao K. H. V.: Hydrological and Hydrodynamic Modeling for Flood Damage Mitigation in Brahmani-Baitarani River Basin, India, *Geocarto International*, Vol. 32(9), pp.1-28, 2016.
- [112] Sharma, S. K., Kwak Y., Kumar, R. and Sarma B.: Analysis of hydrological sensitivity for flood risk assessment, *International Journal of Geo-Information*, Vol. 51, 2018.
- [113] 佐山敬洋, 藤岡奨, 牛山朋来, 建部祐哉, 深見和彦: インダス川全流域を対象とした2010年パキスタン洪水の降雨流出氾濫解析, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.68, No.4, I.493-I.498, 2012.
- [114] 鍋坂誠志, 藤岡奨, 宮本守, 杉浦愛, 岡積敏雄, 田中茂信, 深見和彦: インドネシア国ソロ川流域におけるリアルタイム洪水予警報システムの構築, 河川技術論文集, 第19巻, pp.345-350, 2013.
- [115] Nastiti, K. D., Kim, Y., Jung, K. and An, H.: The application of Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) model for inundation case in upper Citarum Watershed, West Java-Indonesia The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5), pp.166-172, 2015.
- [116] Valencia, C. D. J.: RRI model-based flood evacuation timeline of city and municipality LGUs in Pampanga river basin, Philippines, ICHARM, 2019.
- [117] 寺川陽, 布村明彦, 栗城稔, 加納竜夫, 本永良樹: ベトナム Huong (フォン) 川における洪水管理情報システム (プロトタイプ) の開発, 河川情報シンポジウム講演集, Vol. 2014, pp.5.1-5.10, 2014.
- [118] 佐山敬洋, Lin, N. M., 深見和彦, 田中茂信, 竹内邦良: 降雨流出氾濫モデルによるサイクロナルギス高潮氾濫シミュレーション, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.67, No.4, pp.I.529-I.534, 2011.
- [119] Bhagabati, S. and Kawasaki, A.: Consideration of the rainfall-runoff-inundation (RRI) model for flood mapping in a deltaic area of Myanmar, *Hydrological Research Letters*, 11(3), pp.155 – 160, 2017.

- [120] Mahtab, M. H., Ohara, M. and Rasmy, M.: Effectiveness of the submersible embankment in Haor area in Bangladesh, *Journal of Disaster Research*, Vol.13 No.4, pp. 780-792, 2018.
- [121] 村岡和満, 朝位孝二: ベンガル地域の気象水文量の長期変化と地球規模現象との相関・因果関係の解明: 土木学会論文集 B1(水工学) , Vol.76, No.1, pp.53-69, 2020.
- [122] Kubota, T., K. Aonashi, T. Ushio, S. Shige, Y. N. Takayabu, M. Kachi, Y. Arai, T. Tashima, T. Masaki, N. Kawamoto, T. Mega, M. K. Yamamoto, A. Hamada, M. Yamaji, G. Liu and R. Oki: Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) products in the GPM era, *Satellite precipitation measurement*, Springer, [https : //doi.org/10.1007/978 - 3 - 030 - 24568 - 9_20](https://doi.org/10.1007/978-3-030-24568-9_20), 2020.
- [123] Bangladesh Water Development Board: BWDB Annual Report 2015/2016, 2016.
- [124] 独立行政法人国際協力機構 (JICA) : バングラデシュ国・持続的な水関連インフラ整備に係る能力向上プロジェクト, 2017. プロジェクト事業完了報告書, 2017.
- [125] Muraoka K. and Khalequzzaman K.: Challenges to Achieve Water-Related Disaster Risk Reduction Through Proper Development of The Infrastructures in Bangladesh, *Proceedings of the International Seminar on "Water Resilience in a Changing World" - HATHI 2016*, Bali, Indonesia, 2016.
- [126] CEGIS: Monitoring and prediction of bank erosion along the right bank of the Jamuna river, The Center for Environmental and Geographic Information Services, Dhaka, 2005.
- [127] Flood Forecasting and Warning Centre: Annual Flood Report 2017, Bangladesh Water Development Board, 2017.
- [128] 四国地方整備局河川部, 四国水文観測検討会: 第2版水文観測の手引き (案) H-Q 曲線作成編, 国土交通省四国地方整備局, 2004.
- [129] Sayama, T: Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) Model ver. 1.4.2, International Center for Water Hazard and Risk Management (ICHARM), Public Works Research Institute (PWRI), 2017.
- [130] Muraoka, K., Asai, K., Usui, Y. and Mochizuki, T.: Study on Cause and Mechanism of Hydraulic Structures Failure in Bangladesh, *Proceedings of the 21th IAHR-APD 2018*, pp.399-407, 2018.9.

第6章 結論

6.1 本研究のまとめ

本論文では、東南アジアのラオス人民民主共和国、南アジアのバングラデシュ人民共和国を中心に、それぞれの国家にとって重要な水資源である国際河川のメコン川、ガンジス川、ブラマプトラ川、メグナ川流域で、長年蓄積された貴重な気象水文観測データの時系列変化傾向と、気候変動の指標である SOI, DMI との因果関係を明らかにした。さらには、ガンジス川、ブラマプトラ川、メグナ川流域の降雨流出氾濫一体型モデルを構築し、バングラデシュの河川における水位流量と洪水氾濫を再現し、流域の降雨分布との関係を明らかにした。また、降水量の有意な減少傾向がみられたブラマプトラ川流域、メグナ川流域の 100 年後の流出氾濫の変化を明らかにした。

第 2 章では、ラオスの経済活動になくなくてはならない存在であるメコン川とその支川流域の降水量、河川水位の長期変化傾向について述べた。時系列データについては、統計学的解析手法 t 検定、閾値超過分析、極地解析手法を使って分析した。ラオスにおけるメコン河流域の年間降水量および流量は減少傾向であり、年間降水量は、1) 特に南部において「有意な減少傾向」であること、2) 年間降水量は減少傾向であるが、日雨量 100mm を超える降雨は増加傾向である、これは近年山岳地帯でのフラッシュ洪水の増加の原因にもなっていること、3) 河川の洪水流量、渇水流量はやや減少傾向であるが、年々変動幅がおおきくなっており、洪水や渇水のリスクが高まってきていること、等の新たな知見が得られた。

第 3 章では、水災害に対し世界で最も脆弱な国土を有しているバングラデシュと周辺のベンガル地域における、降水量、河川水位の長期変化傾向について述べた。時系列データについては、統計学的解析手法 Mann-Kendall 検定、Seasonal Mann-Kendall 検定を使って分析した。なお、ここでは Mann-Kendall 検定の弱点を克服するために、STL を使った平滑化手法を新たに提案し、その有用性を確認している。バングラデシュにおける 32 年間の月降水量は、1) 中部～北部地域で減少傾向で、特に中部において有意であること、2) 南部～南東部で変化無し、または上昇傾向であること、3) ベンガル地域の降水量は、116 年間で有意な減少傾向であるが、近年 32 年間のほうがその変化の傾きが大きいこと、4) 降水量が増加している地域では統計的に有意な水準で激しい降水の頻度が増え、降水量が減少している地域では強い降水が減少していることを、バングラデシュの観測データで確認し、「雨の降り方が変わってきた」ことを定量的に明らかにすることができたこと、5) 三大河川の水位は 30 年間で有意な減少傾向で、特にブラマプトラ川の減少の割合が大きく、2010 年以降で低水位以下の水位減少が顕著であること、等の新たな知見が得られた。

第4章では、エルニーニョおよびインド洋ダイポールに関する指数 SOI, DMI との相関・因果関係について述べた。統計学的解析手法 Wavelet, Cross-Wavelet コヒーレンス, 統計的因果推論の手法の一つである VAR-LiNGAM を使って分析した。なお, 統計学的因果推論手法を気象水文データに適用した既往研究は, 筆者が知る限り存在せず, 本研究において, はじめて適用可能であることと, その有用性を確認している。ベンガル地域の降水量には, SOI よりも DMI の相関が大きく, 5~6ヶ月の時間差で DMI から降水量への因果関係が存在することが明らかになった。一方で, 降水量が多い地点では, DMI よりも SOI の影響が大きいことも新たに明らかになった。

第5章では, バングラデシュの過去の4ケースの洪水氾濫について, 流出と氾濫を一体的に解析できる RRI モデルを用いて再現し, 観測値と比較することによって, バングラデシュ国内河川の水位および流量, そして, 洪水氾濫の特徴を総合的に考察した。また, 第3章で明らかになった結果を用いて, ブラマプトラ川, メグナ川流域の水位および流量, 洪水氾濫の変化を予測した。ガンジス川, ブラマプトラ川, メグナ川のような巨大な流域面積をもつ RRI モデルを構築したのは本研究が初めての例となる。メグナ川のような非常にフラットで中央部に広大な窪地を持つ地形での再現計算も過去に例がなかったが, 本研究において水位流量, 氾濫域を特定の年に限定して再現することができたとともに, 再現性の良かった年のモデルを用いてバングラデシュ国内の洪水氾濫の要因を定量的に確認することができた。さらに, ベンガル地域において, 現在までの気象・水文量の変化傾向が継続すると仮定すると, メグナ川流域では最大 10cm の水位低下, 下流では 10cm の水位上昇が発生, ブラマプトラ川の流量は平均で約 $130\text{m}^3/\text{s}$ 程度の減少が予想される。この結果については, 将来の洪水リスクはさほど大きく変化するものではないが, 一方で水利用のリスクが新たに発生することになるとも考えられる。

6.2 今後の展望

本研究は, 開発途上国で実際に観測された気象水文データを解析し, 過去からの変化傾向や気候変動を表す指数との相関や因果関係を明らかにしたものである。ラオス, バングラデシュともにデータベースに登録されているデータを利用したため, 分析結果については信頼度が高いと考えられる。しかし, データ蓄積期間は長くても 32 年程度であり, 気候変動のスケールに比べると非常に短いものである。また, バングラデシュ周辺インドのデータは, 観測値を統計処理した月単位の値であることから, 時間あるいは日雨量, また無降雨日数などの極端気象現象については分析することができなかった。研究対象地域の分析結果をさらに確実なものとするためには, より詳細なデータを用いた分析を実施する必要がある。我が国での気象水文観測間隔は, 10 分単位, 1 時間単位は今やあたりまえのこととなっており, これらのデータを用いた流出解析, 氾濫解析などは, 水災害の要因を分析するために必要不可欠である。一般に開発途上国での気象水文観測体制は我が国のように充実しておらず, データに乏しい地域が多い, あるいはデータが存在していても入手に多くの困難が伴う。

また、RRI モデルについては過大評価、過小評価となる地点がいくつか見られたため、精度向上のためのさらなる研究が必要である。

このような状況において、水災害の要因を分析するための手法として以下の3つの方針を提言し、本論文の結びとする。

- (1) d4PDF, JRA55 等の再解析値を利用した観測値の傾向との比較検証
- (2) d4PDF の将来予測を用いた降水量等の傾向分析
- (3) RRI モデルの再現精度向上と d4PDF を用いた将来の水災害リスクの予測

まず(1)について、d4PDF (地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース, database for Policy Decision making for Future climate change) は、文科省・気候変動リスク情報創生プログラムにおいて、高解像度全球大気モデルおよび高解像度領域大気モデルを用い、これまでにない多数 (最大 100 メンバ) のアンサンブル実験で作成されたデータベースである。過去の顕著気象イベントに対する要因分析、将来変化予測の自然変動不確実性の理解、影響評価研究などが飛躍的に進むこと、等が期待されている。JRA55 は、ラジオゾンデによる定時観測ネットワークが確立された 1958 年からの 55 年間を対象とし、過去半世紀以上の気候変化をより高精度に解析した気候データセットである。これらの再解析データベースを用いて、本研究で解析したメコン川およびガンジス・ブラマプトラ・メグナ川流域の変化傾向を同様に分析し、観測データと一致しているかを検証することが求められる。

(2) は(1)の検証で矛盾点がないこと前提に、d4PDF の将来予測を用いて、将来の降水量の変化傾向を分析する。さらに wavelet 等を用いて変動の特徴を示すことが求められる。

その上で(3)では、構築した RRI モデルを用いて、降雨データに d4PDF を入力した流出氾濫解析を実施し、将来の水位流量や氾濫面積の変化傾向を明らかにすることが求められる。

本研究においては、ラオス、バングラデシュの気象水文データの分析結果から、両国に共通して、年間降水量は有意な減少を示しているが、一方で極端な現象は増加していることが明らかになっている。構築した RRI モデルと d4PDF を用いて、将来の気候変動にともなう水文水理現象の変化を予測し、バングラデシュの洪水対策計画、あるいは水資源管理計画を見直していくことが必要となるであろう。

謝辞

本研究を進めるにあたって、学位論文の主査を務めていただいた指導教官の山口大学大学院創成科学研究科教授、朝位孝二先生より、著者が大学院博士前期課程に入学した平成24年4月から、長きにわたって親身かつ丁寧にご指導をいただきました。朝位先生からは、学術分野における研究論文の基本的な考え方、研究活動の取り組み方、論文の整理の方法、わかりやすいプレゼンテーションの方法等、多くのご指導をいただきました。指導をいただいた8年間は、著者が所属する勤務先での業務においても大きな自信となり、様々な業務活動に前向きに取り込むことが可能となりました。学位論文の審査にあたっては、山口大学大学院創成科学研究科の4名の先生方に副査をお願いしてご助言を賜りました。教授の関根雅彦先生には、学位論文の全体的な構成からプレゼンテーションでの説明の流れに至るまで、丁寧なご助言とご指導をいただきました。教授の赤松良久先生には、学位論文の要となった流出氾濫解析の実施について著者の背中を推していただき、解析結果の考え方や説明の流れ、あるいは、わかりやすいプレゼンテーション資料の作成など、多大なご指導をいただきました。准教授の山本浩一先生には、河川環境分野での豊富なご知見から、水文データの精度面、適切性についてのご指摘や丁寧なご指導、そして解析結果の正確性の議論に役立つヒントをいただきました。准教授の神野有生先生には、気象学、統計学の視点から特に気象水文データの長期変化傾向の分析における注意点や、分析手法における説明の流れなどでご指摘をいただき、論文構成の見直しのヒントとなる丁寧なご助言をいただきました。主査、副査を務めたいいただいた先生方に対し、ここに、深く感謝の意を表します。

また、著者の所属勤務先や、ラオス、バングラデシュの2か国の各地域における皆様からも多大なご支援をいただきました。

学位論文執筆にあたる過程において、当方は社会人ドクターとして山口大学大学院理工学研究科に在籍していました。2014年から途中3年間は、JICA 専門家としてバングラデシュ人民共和国に派遣されるなど、環境が目まぐるしく変化する中で、担当する業務がありながらも社会人ドクターとして研究活動を行うことについて快く承諾いただいた、国土交通省中国地方整備局山口河川国道事務所の歴代事務局長である池田憲二氏、故西野賢治氏、廣川誠一氏、高井嘉親氏、派遣先のバングラデシュ水開発庁元長官の Mahfuzur Rahman 氏、JICA 東京本部や JICA バングラデシュ事務所の職員の皆様、当方の研究活動を応援してくださった土木研究所 ICHARM の皆様、バングラデシュでのプロジェクトチームの皆様には、心から感謝を申し上げたいと思います。

また、朝位研の神野真理子秘書、学部生の稲葉柁君には、バングラデシュより提供いただいた膨大な気象水文データの編集、解析作業、RRI 計算結果の取りまとめ作業など、多大な

ご協力を頂きました，ここに厚くお礼申し上げます。

最後に，長期にわたり私の研究活動に理解を頂き，多大な迷惑をかけたであろう妻，村岡桂子ほか家族に対しまして，心から深く感謝いたします。

なお，本研究の活動資金は，日本学術振興会科学研究費（基盤研究(B)（一般），課題番号18H01681，「120年雨量データベース構築と地理空間情報の統合化による水害常襲地のリスク評価」，代表：山本晴彦）の支援を受けました。また，本研究の降雨流出氾濫計算には，九州大学情報基盤研究開発センターの研究用計算機システム（スーパーコンピュータ）を利用しました。ここに記し謝意を表します。

付録A 計算結果

A.1 観測流量と計算流量の比較

A.1.1 Burahmaputra 川流域代表地点における流量実測値と計算値の比較

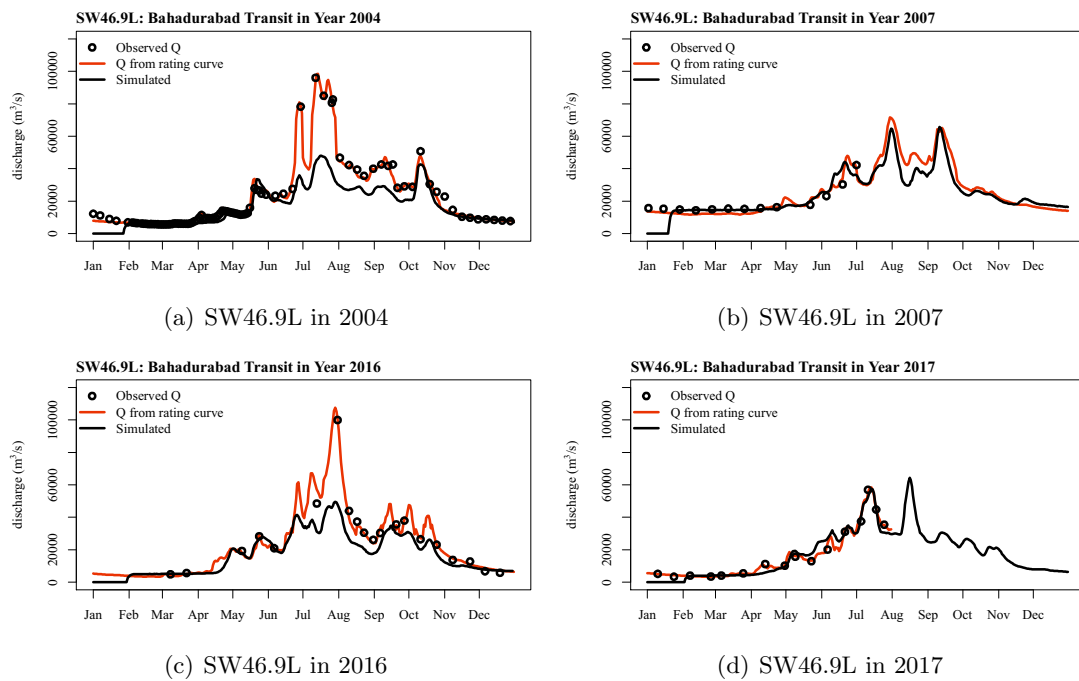
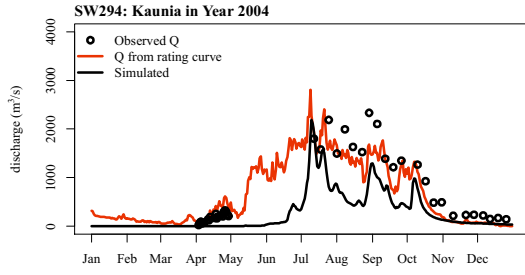
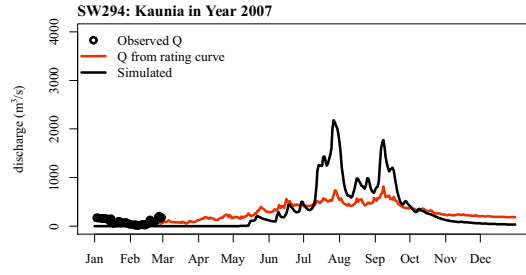


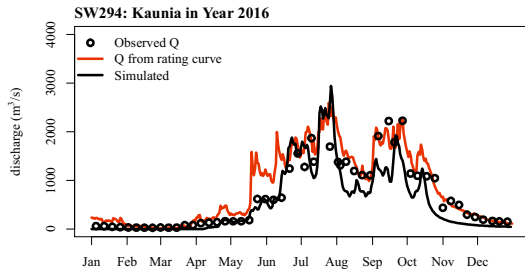
図 A.1 Burahmaputra 川 SW46.9L 地点の流量実測値と計算値の比較



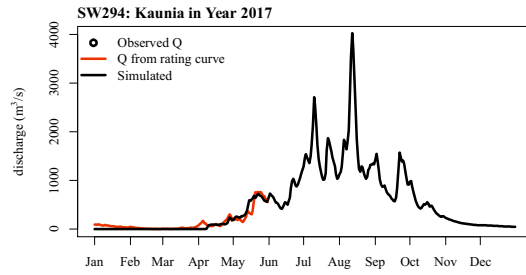
(a) SW294 in 2004



(b) SW294 in 2007

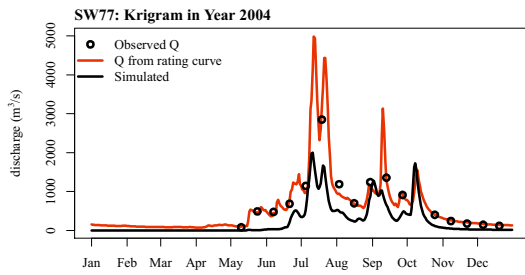


(c) SW294 in 2016

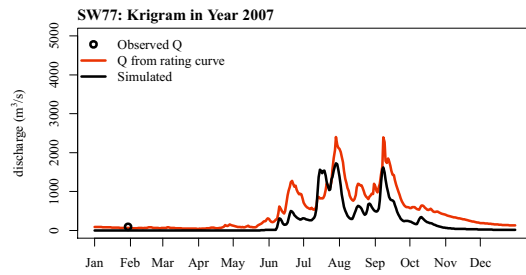


(d) SW294 in 2017

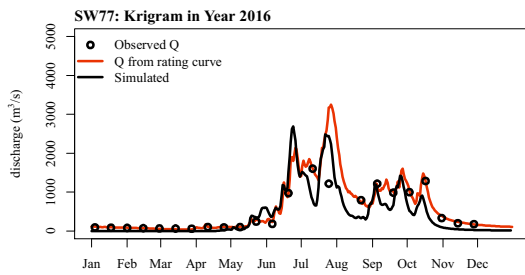
図 A.2 Teesta 川 SW294 地点の流量実測値と計算値の比較



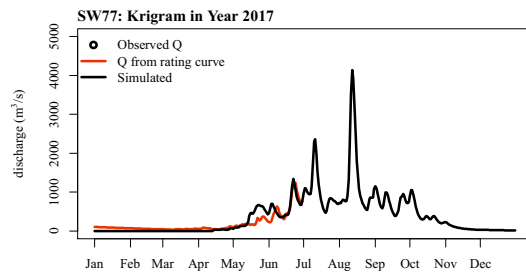
(a) SW77 in 2004



(b) SW77 in 2007



(c) SW77 in 2016



(d) SW77 in 2017

図 A.3 Dharla 川 SW77 地点の流量実測値と計算値の比較

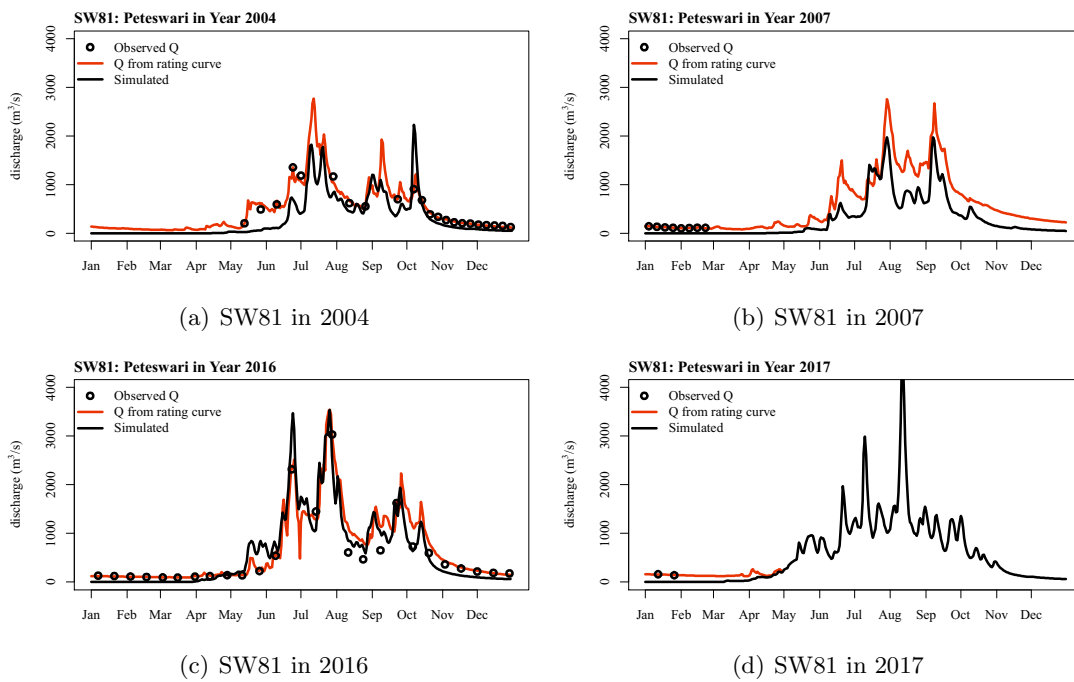


図 A.4 Dudhkumar 川 SW81 地点の流量実測値と計算値の比較

A.1.2 Ganges 川流域代表地点における流量実測値と計算値の比較

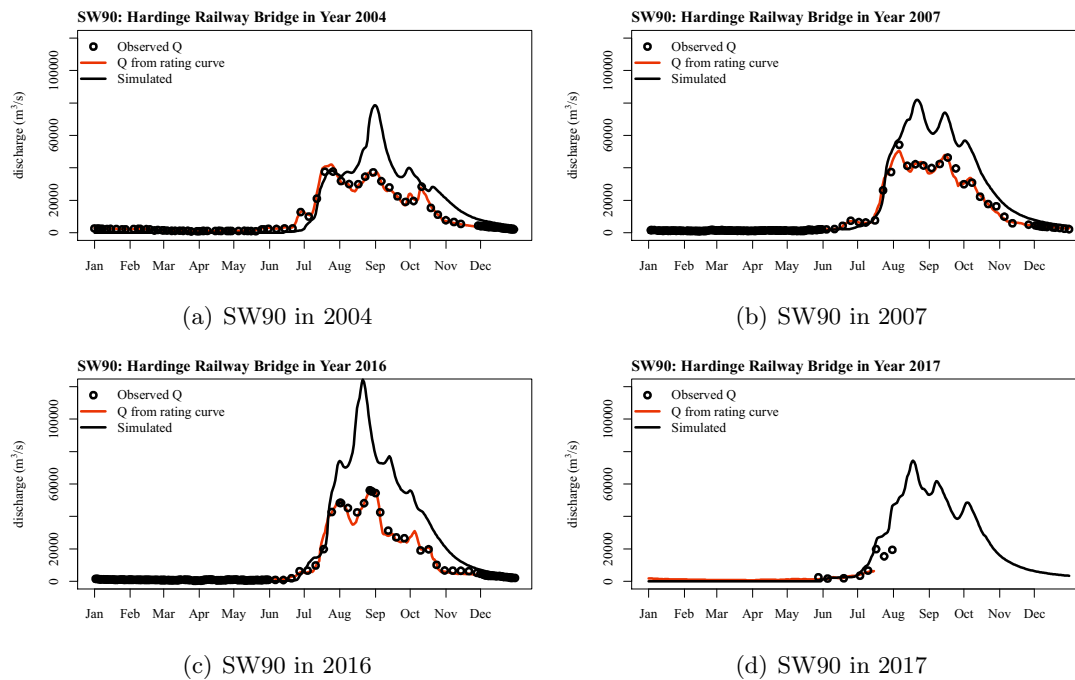


図 A.5 Ganges 川 SW90 地点の流量実測値と計算値の比較

A.1.3 Meghna 川流域代表地点における流量実測値と計算値の比較

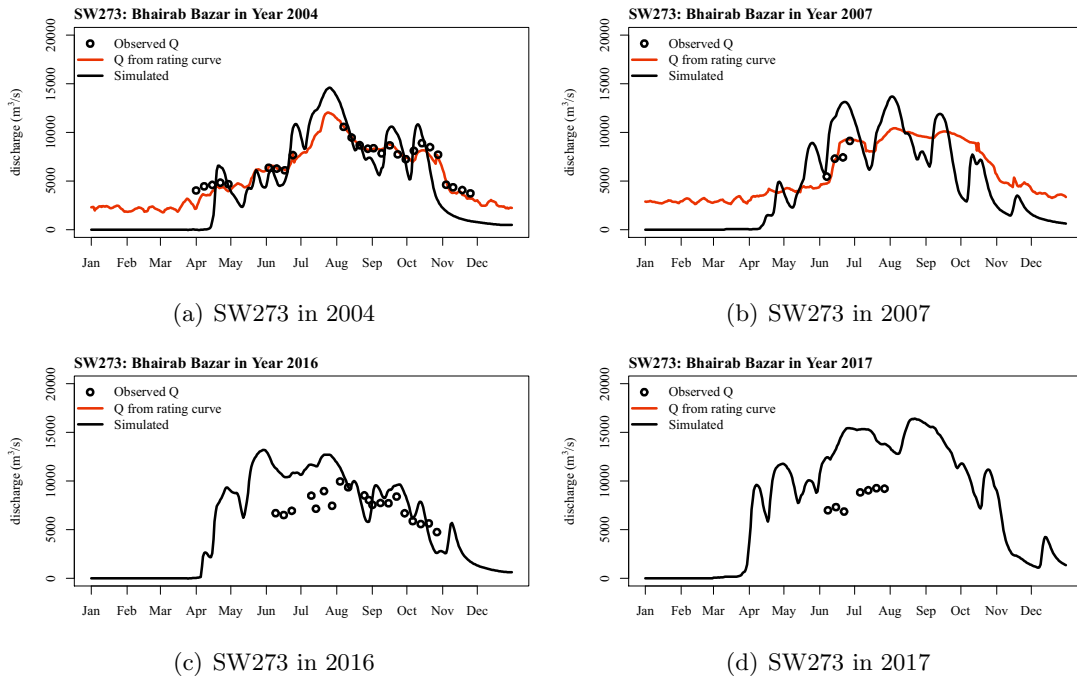


図 A.6 Meghna 川 SW273 地点の流量実測値と計算値の比較

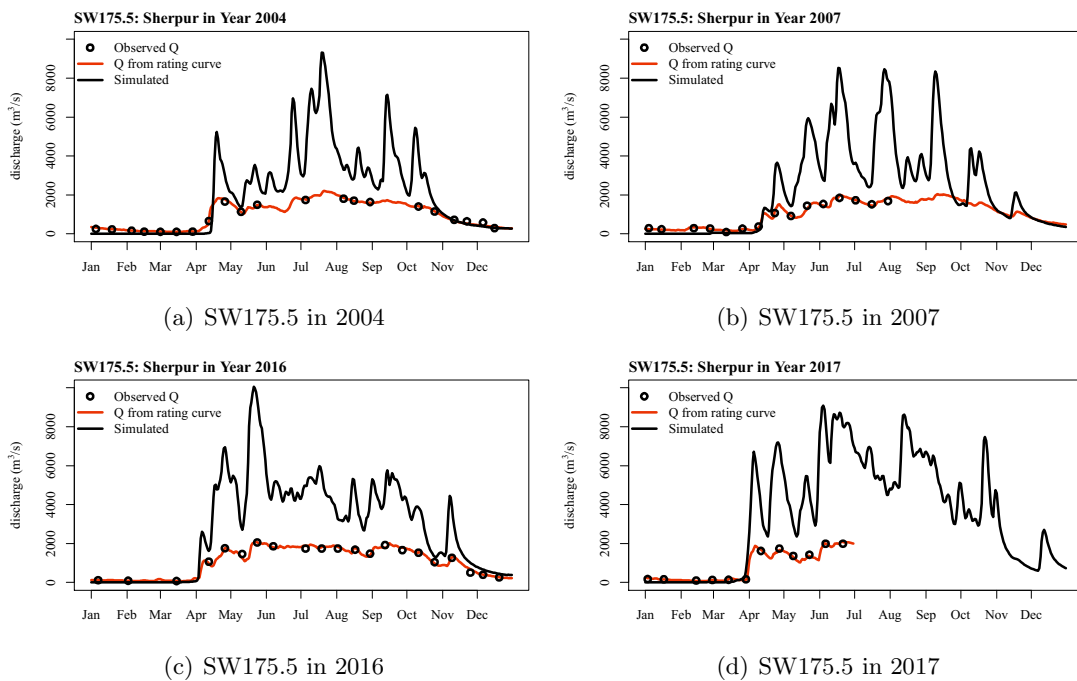
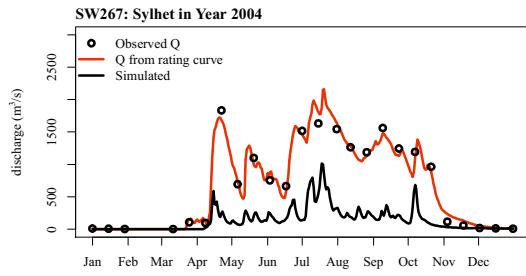
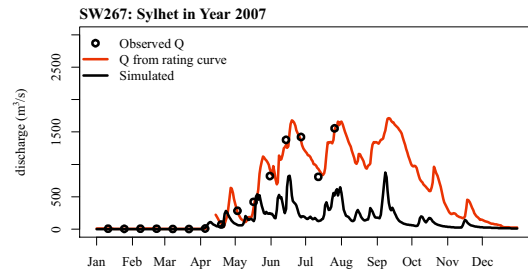


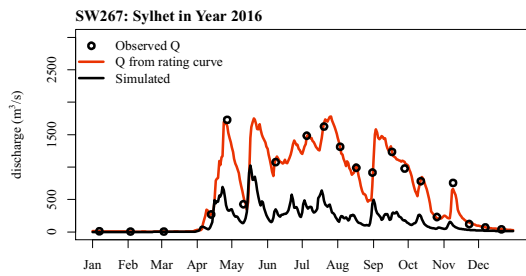
図 A.7 Kushiyara 川 SW175.5 地点の流量実測値と計算値の比較



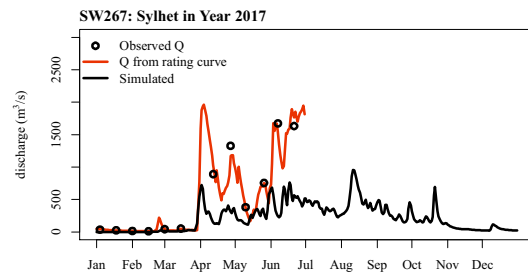
(a) SW267 in 2004



(b) SW267 in 2007

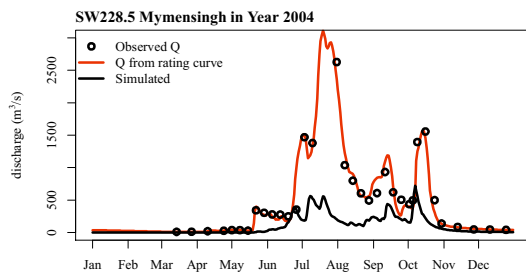


(c) SW267 in 2016

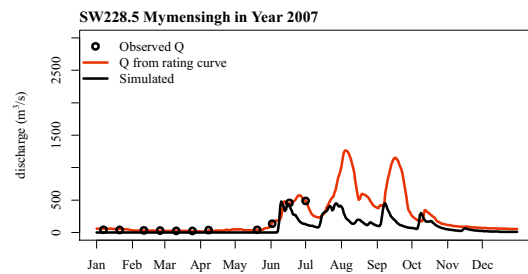


(d) SW267 in 2017

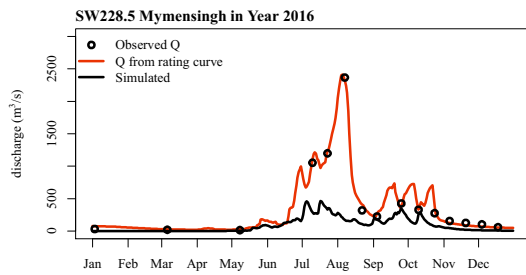
図 A.8 Surma 川 SW267 地点の流量実測値と計算値の比較



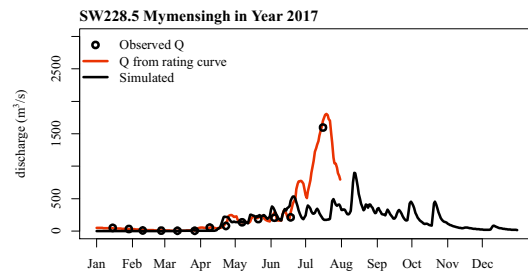
(a) SW228.5 in 2004



(b) SW228.5 in 2007



(c) SW228.5 in 2016



(d) SW228.5 in 2017

図 A.9 Old Burahmaputra 川 SW228.5 地点の流量実測値と計算値の比較

A.1.4 Haor 代表地点における流量実測値と計算値の比較

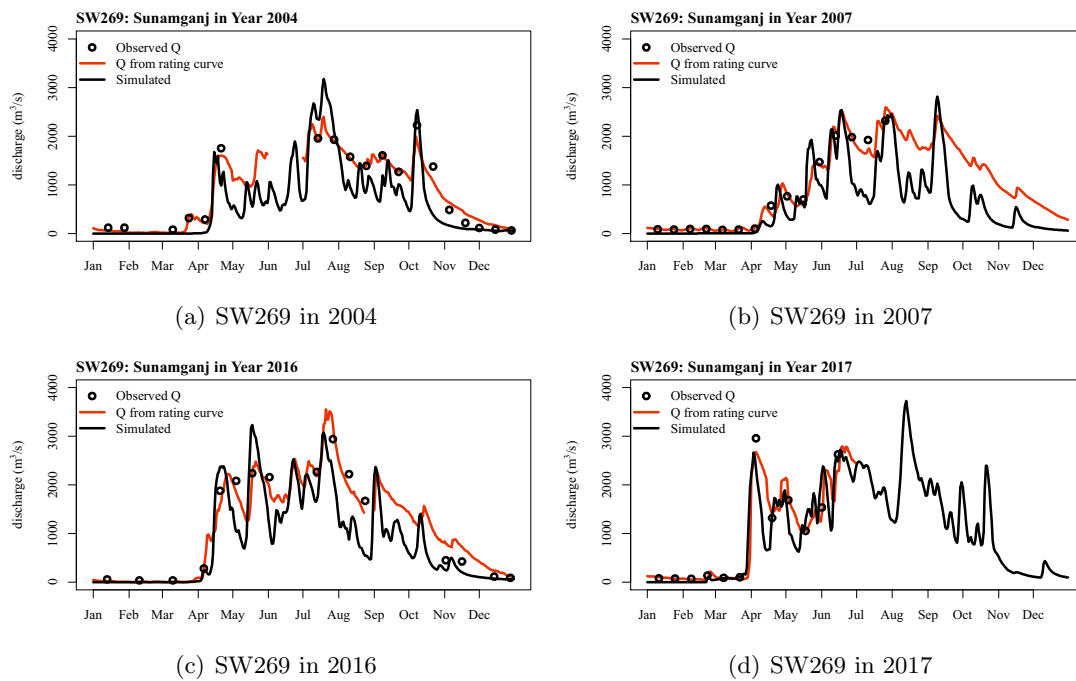
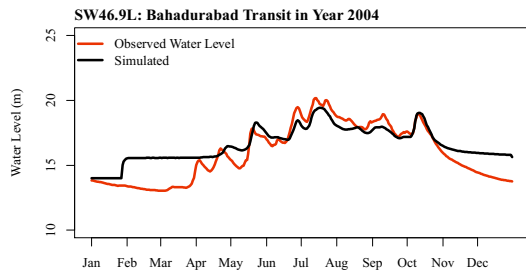


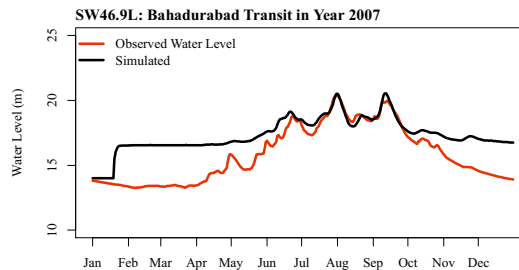
図 A.10 Haor (ハオール) SW269 地点の流量実測値と計算値の比較

A.2 観測水位と計算水位の比較

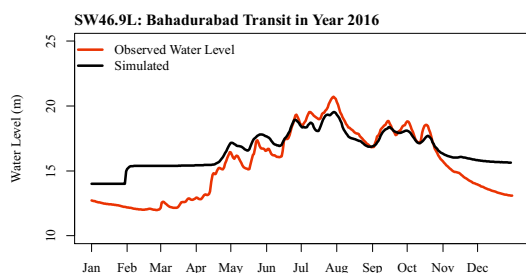
A.2.1 Burahmaputra 川流域代表地点における水位実測値と計算値の比較



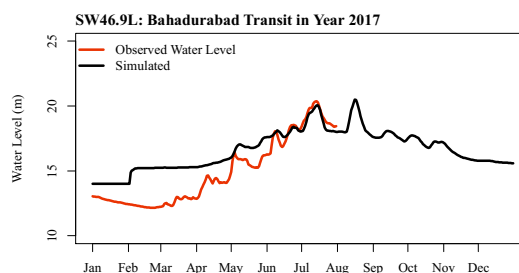
(a) SW46.9L in 2004



(b) SW46.9L in 2007

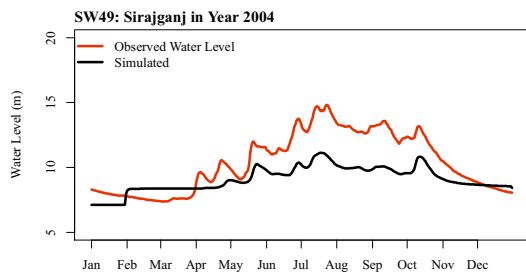


(c) SW46.9L in 2016

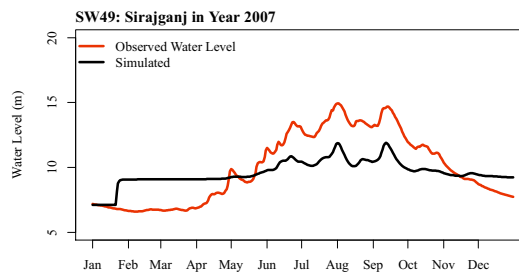


(d) SW46.9L in 2017

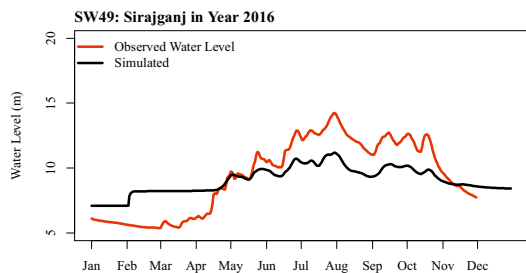
図 A.11 Burahmaputra 川 SW46.9L 地点の水位実測値と計算値の比較



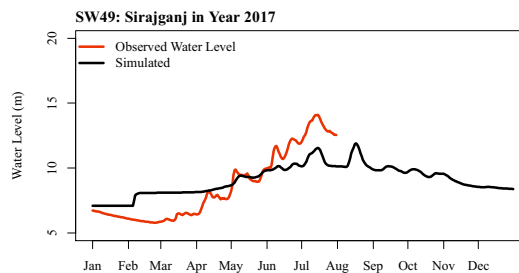
(a) SW49 in 2004



(b) SW49 in 2007



(c) SW49 in 2016



(d) SW49 in 2017

図 A.12 Burahmaputra 川 SW49 地点の水位実測値と計算値の比較

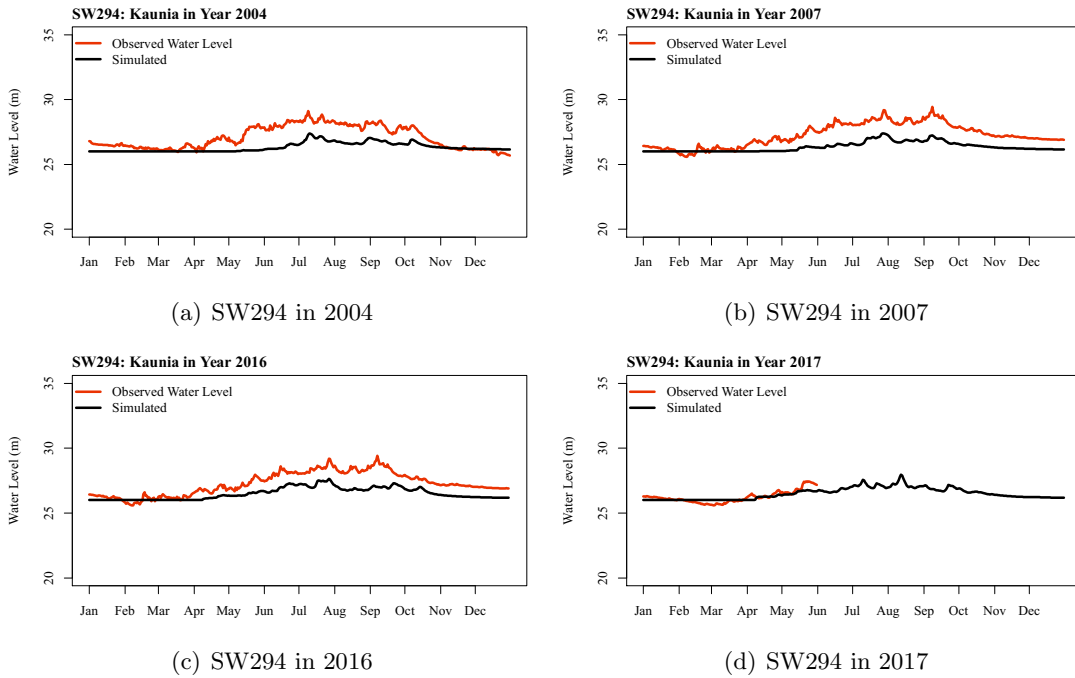


図 A.13 Teesta 川 SW294 地点の水位実測値と計算値の比較

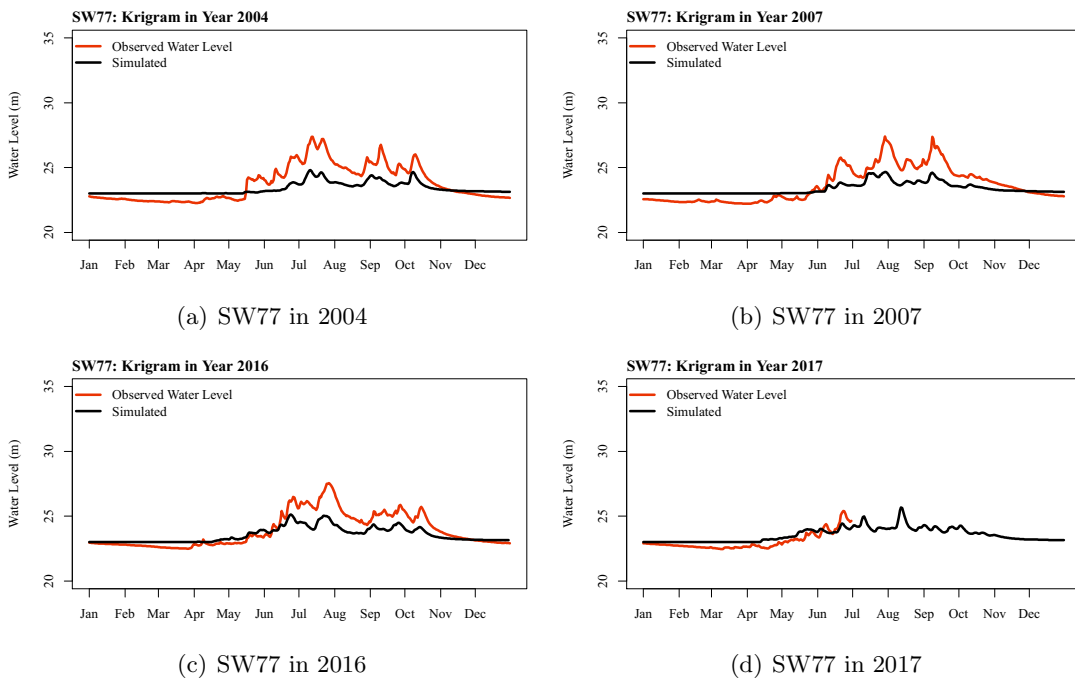
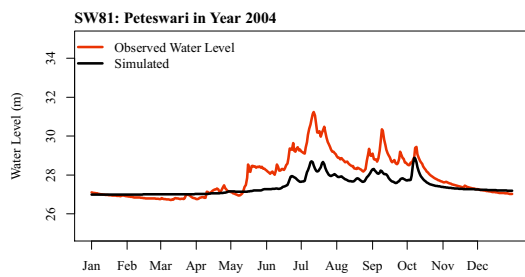
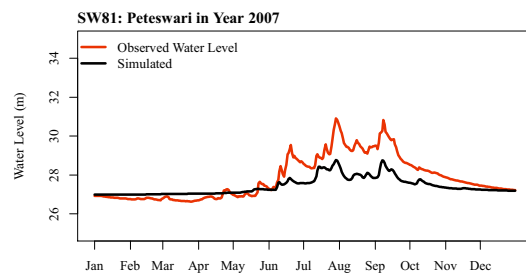


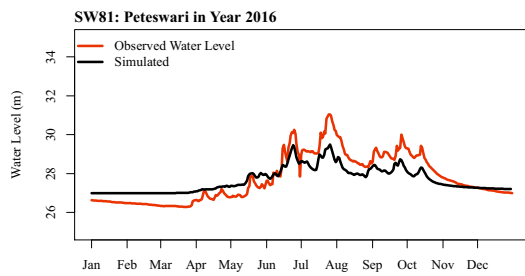
図 A.14 Dharla 川 SW77 地点の水位実測値と計算値の比較



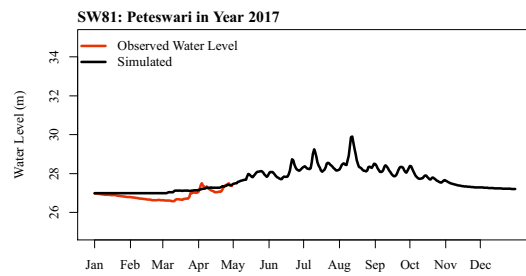
(a) SW81 in 2004



(b) SW81 in 2007



(c) SW81 in 2016



(d) SW81 in 2017

図 A.15 Dudhkumar 川 SW81 地点の水位実測値と計算値の比較

A.2.2 Ganges 川流域代表地点における水位実測値と計算値の比較

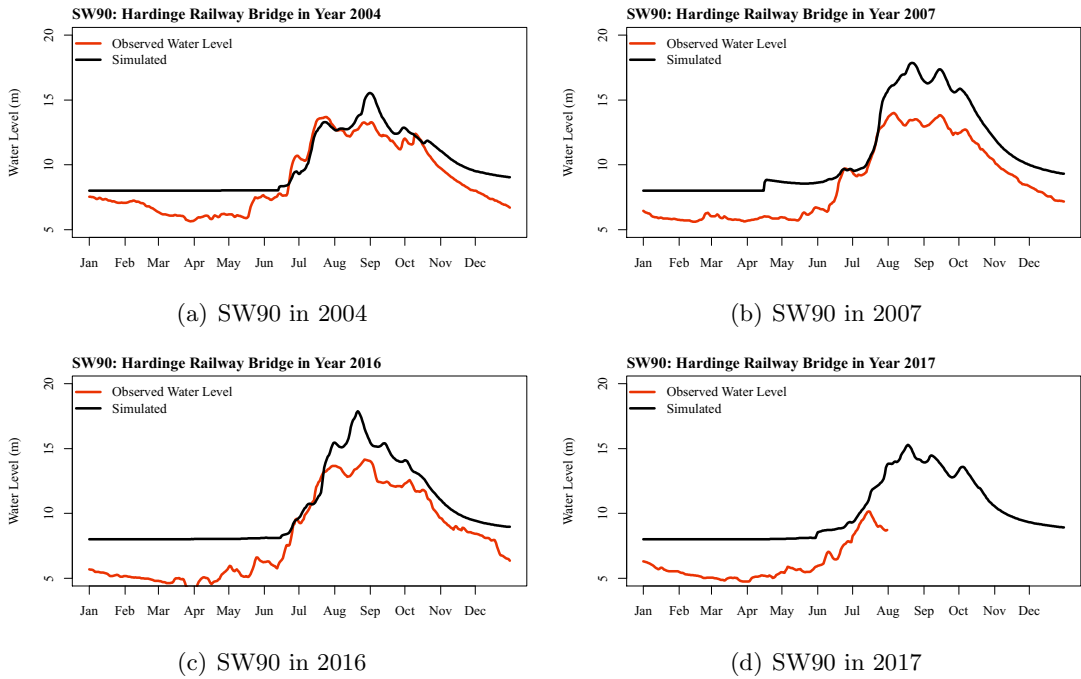


図 A.16 Ganges 川 SW90 地点の水位実測値と計算値の比較

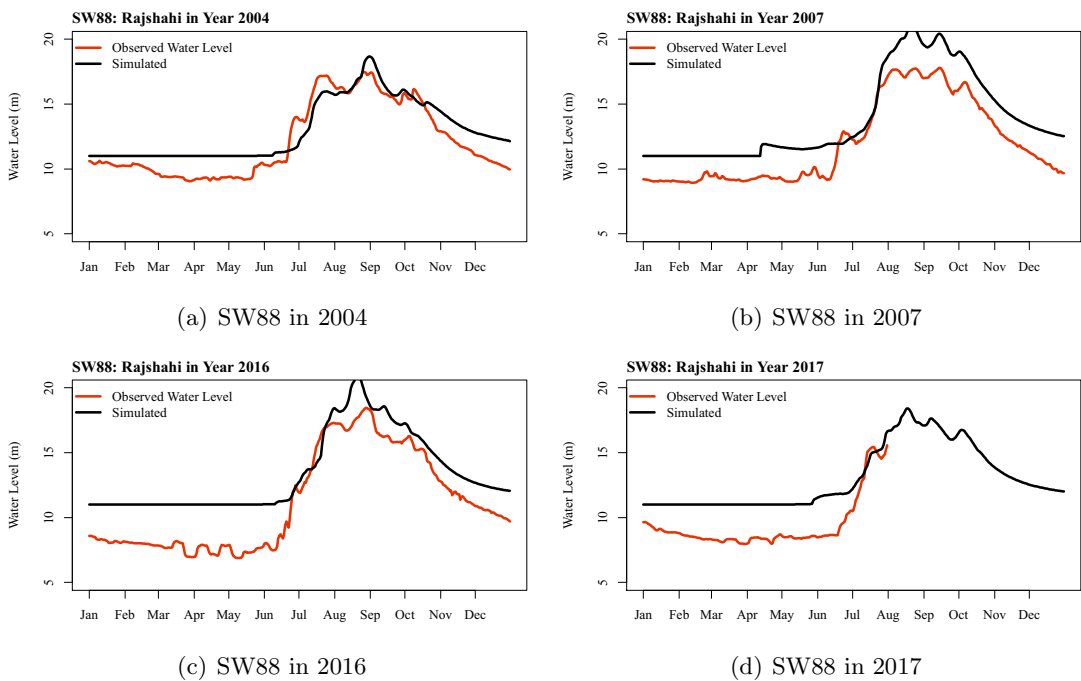


図 A.17 Ganges 川 SW88 地点の水位実測値と計算値の比較

A.2.3 Meghna 川流域代表地点における水位実測値と計算値の比較

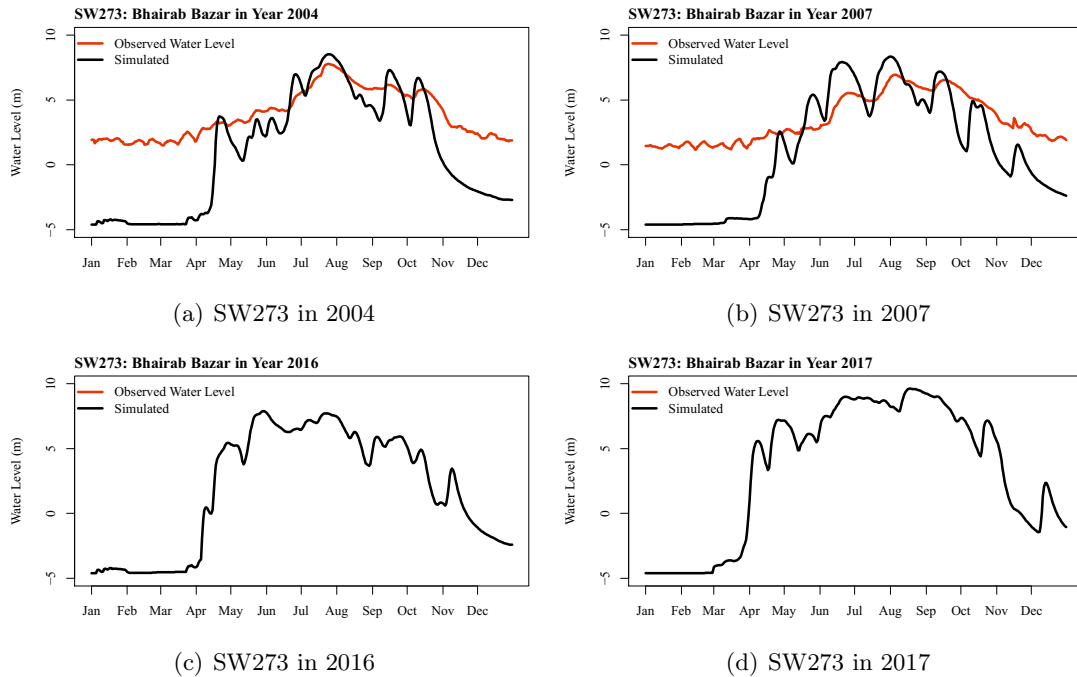


図 A.18 Meghna 川 SW273 地点の水位実測値と計算値の比較

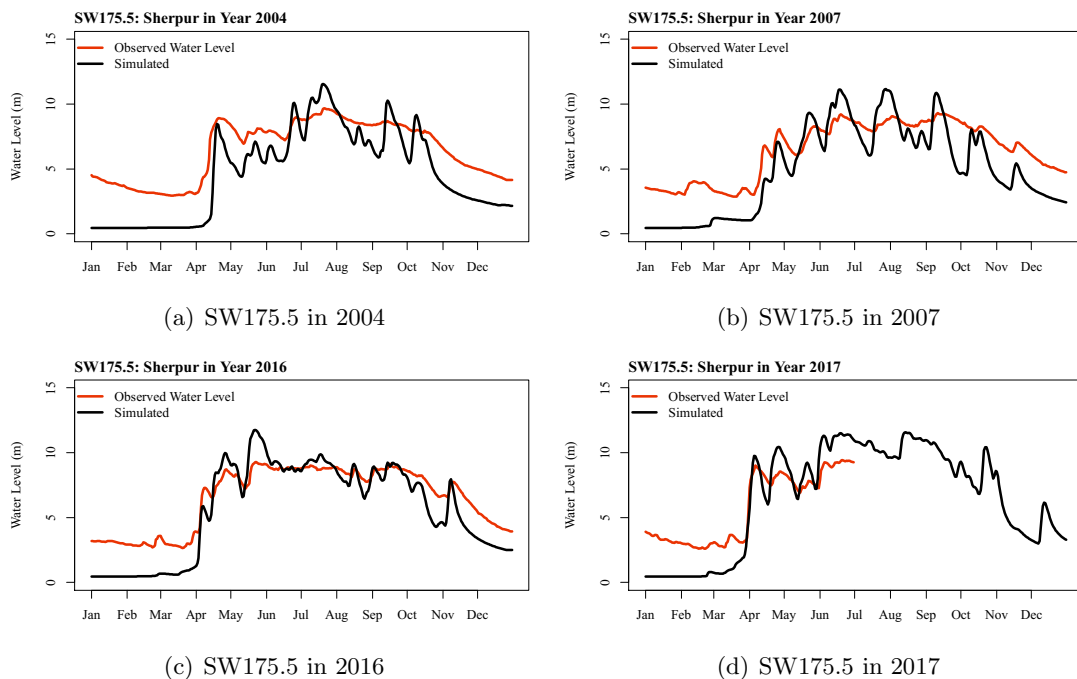
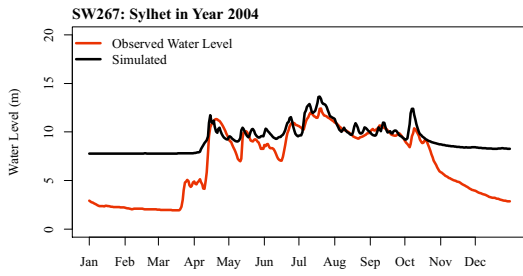
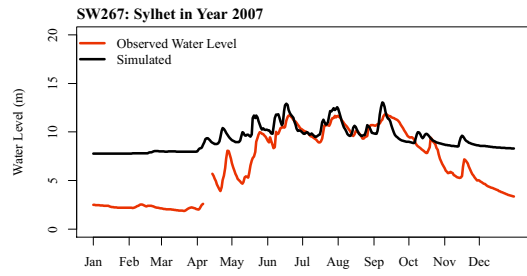


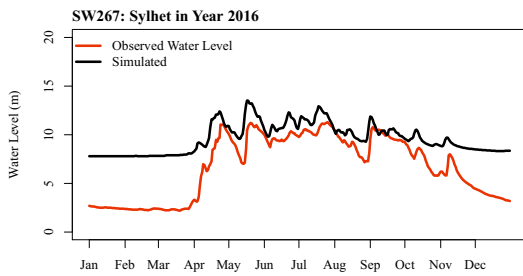
図 A.19 Kushiyara 川 SW175.5 地点の水位実測値と計算値の比較



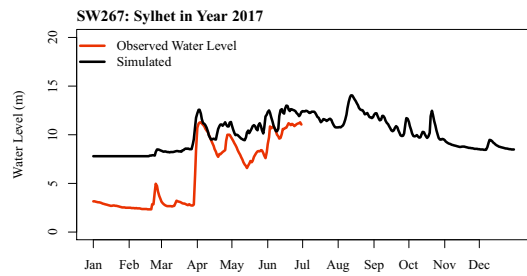
(a) SW267 in 2004



(b) SW267 in 2007

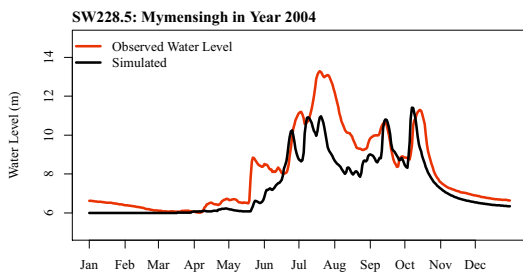


(c) SW267 in 2016

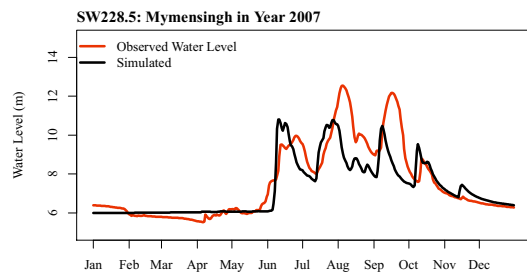


(d) SW267 in 2017

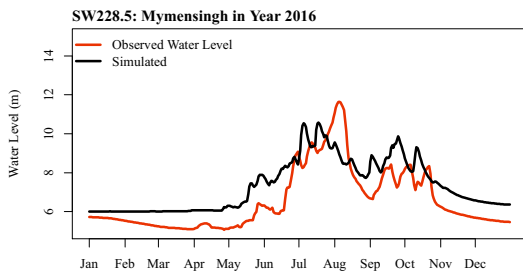
図 A.20 Surma 川 SW267 地点の水位実測値と計算値の比較



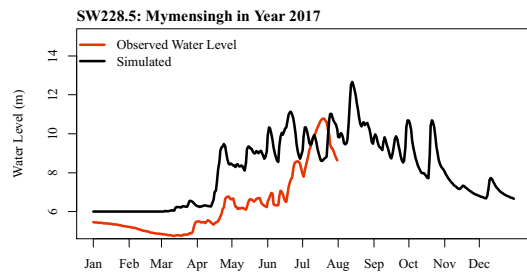
(a) SW228.5 in 2004



(b) SW228.5 in 2007

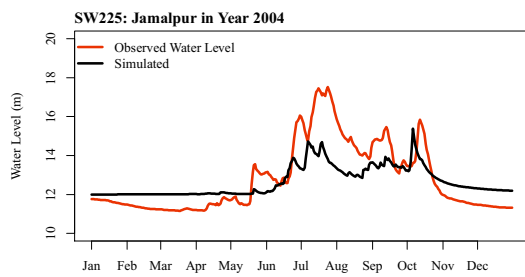


(c) SW228.5 in 2016

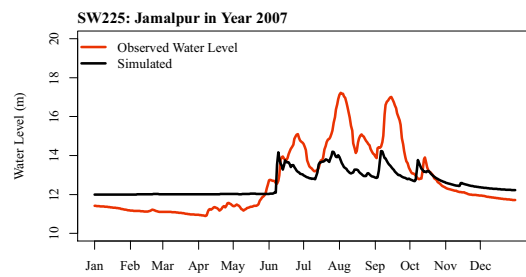


(d) SW228.5 in 2017

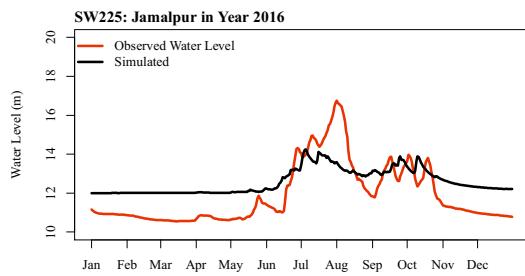
図 A.21 Old Burahmaputra 川 SW228.5 地点の水位実測値と計算値の比較



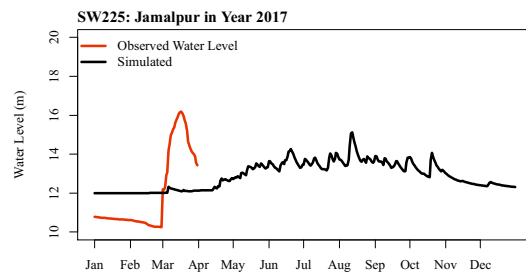
(a) SW225 in 2004



(b) SW225 in 2007



(c) SW225 in 2016



(d) SW225 in 2017

図 A.22 Old Burahmaputra 川 SW225 地点の水位実測値と計算値の比較

A.2.4 Haor 代表地点における水位実測値と計算値の比較

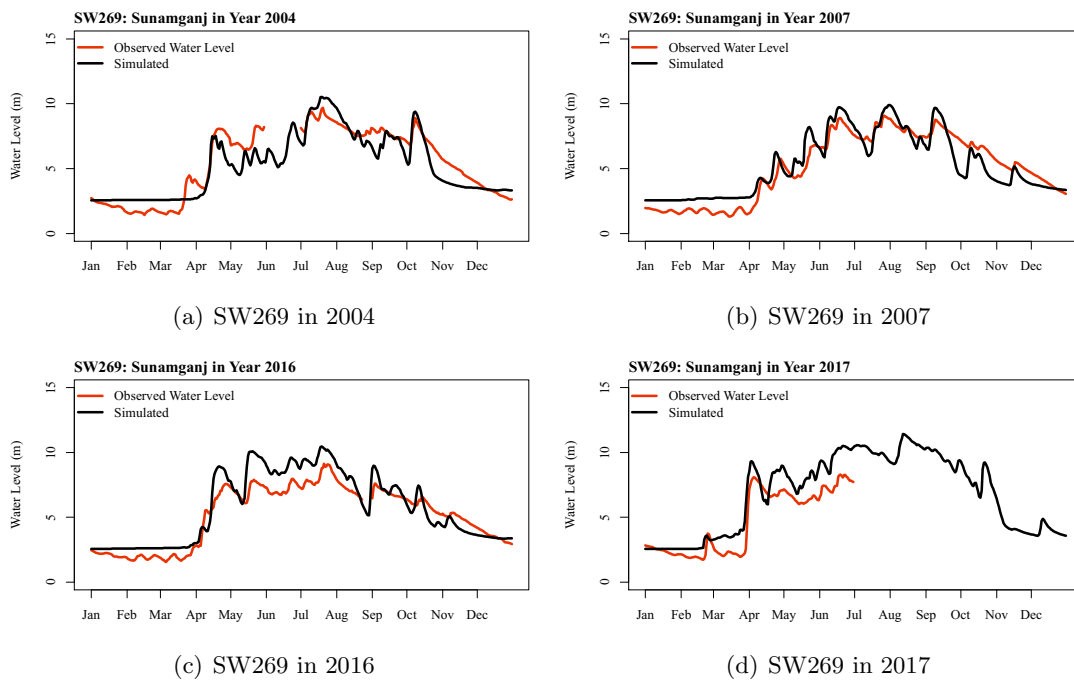


図 A.23 Haor (ハオール) SW269 地点の水位実測値と計算値の比較