



超過洪水による氾濫被害を軽減するための治水施設の総合的な効果分析手法の研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2018-05-24 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 沖, 岳大 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.15118/00009624

博士學位論文

題 目 超過洪水による氾濫被害を軽減するための
治水施設の総合的な効果分析手法の研究

氏 名 沖 岳 大

提出年月日 平成 29 年 9 月

博士論文申請者： 工学専攻 先端環境創生工学コース 沖 岳大

博士論文題目

超過洪水による氾濫被害を軽減するための治水施設の総合的な効果分析手法の研究

氏 名 沖 岳大

論文内容の要旨

近年、気候変動に起因すると言われる極端な気象現象が顕著で、想定を上回る洪水（超過洪水）が発生し、日本各地で河川の氾濫や土砂災害被害が発生している。北海道でも平成28年8月に約2週間で4つの台風が上陸・接近し、甚大な被害となった。水害リスクの評価方法は、 $\text{リスク} = \text{ハザード} \times \text{エクスポージャー} \cdot \text{脆弱性}$ と定義される。ここで洪水被害においては、ハザードは降雨強度や頻度、エクスポージャーは人口や資産、脆弱性は国土構造（地形等）と社会構造（過疎化等）で構成される。この中で、流域の主要部が地盤の低い地盤を流れる低平地河川は、地形的な脆弱性を有する課題がある。

そこで本研究は、洪水被害を総合的に軽減することを目的として、まず1つ目として、避難情報の提供やダム・遊水地などの治水施設の操作を予め行うために用いることができる数値予報降雨の適用性に関して分析を行い、次に2つ目として、脆弱性が高い低平地河川における氾濫解析モデルを構築し、最後に3つ目として、超過洪水のリスクに対して氾濫被害を軽減できるような治水施設の運用について分析できる総合的な氾濫解析モデルの研究開発を行った。

具体的な研究内容は、数値予報降雨の適用性の分析では、全国で近年発生し被害をもたらした豪雨について、2種類の数値予報降雨（GSM, MSM）で計算された予測雨量と観測雨量を比較し、予測雨量の補正方法を提示した。

次に低平地河川を対象とした外水・内水を一体化した氾濫解析モデルの構築では、背水影響による支川の越水、樋門や排水機場の操作を考慮し、既往の大規模出水であるS56洪水を高い精度で再現した。このモデル構築により、低平地河川のリスクを把握するとともに、気候変動に伴う超過洪水の影響予測を行う基礎を築いた。

最後に、超過洪水に対する治水施設の総合的な効果に関する研究では、樋門・ポンプ排水・ダムを含む氾濫解析モデルに遊水地群を加え、気候変動により拡大する浸水範囲の予測や、その場合における遊水地群が整備された場合の超過洪水に対する効果や影響について、総合的な評価を行った。

以上より、本論文は、これまで経験したことの無い豪雨に対し、洪水被害を軽減する有効な方法を提示するものである。そして、将来見込まれる気候変動や社会環境の変化に対して、新しい河川管理施設の操作・運用のあり方や、最適な避難方法を検討する上で、役立つことができると考える。

超過洪水による氾濫被害を軽減するための 治水施設の総合的な効果分析手法の研究

目 次

第1章 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 超過洪水対策に関する最近の研究	3
1.3 論文の構成	6
1.4 参考文献	8
第2章 気象変化と豪雨に伴う課題	9
2.1 日本における気象変化	9
2.2 2016年8月北海道豪雨	15
2.3 豪雨災害とその課題	21
2.4 課題解決の方向性	22
2.5 参考文献	23
第3章 近年発生した極端豪雨に対する数値予報降雨の適用性	24
3.1 数値予報降雨の概要	24
3.2 対象降雨	27
3.3 時系列雨量および積算雨量の相関	35
3.4 積算雨量の時系列での評価	40
3.5 積算予測雨量の誤差範囲の推定	43
3.6 本章のまとめ	50
3.7 参考文献	51

第4章 低平地河川を対象とした内水・外水を	
	一体化した氾濫解析手法・・・・・・・・・・ 53
4.1 対象流域の特徴・・・・・・・・・・	53
4.2 対象流域・・・・・・・・・・	55
4.3 内水・外水を一体化した氾濫解析モデル・・・・・・・・	59
4.4 解析事例・・・・・・・・・・	67
4.5 本章のまとめ・・・・・・・・・・	72
4.6 参考文献・・・・・・・・・・	73
第5章 超過洪水による氾濫被害を軽減するための	
	治水施設の総合的な効果分析手法・・・・・・・・ 74
5.1 超過洪水の設定・・・・・・・・・・	74
5.2 治水施設の概要・・・・・・・・・・	77
5.3 解析条件・・・・・・・・・・	84
5.4 超過洪水による治水施設の総合的な効果・・・・・・・・	87
5.5 本章のまとめ・・・・・・・・・・	102
5.6 参考文献・・・・・・・・・・	103
第6章 結論・・・・・・・・・・	104
謝辞・・・・・・・・・・	106

第1章 序論

1.1 はじめに

我が国は、国土面積の1割の狭い沖積平野に人口の1/2、財産の3/4が集中し、自然災害の危険性が高い。このような中、I P C C 第5次評価報告書^{1), 2)}では、気候変動に伴い日本の降雨量は1.2倍程度になると予測された。国土交通省の推計では、一級水系の治水安全度が1/100確率の規模で計画されても、気候変動に伴う降雨の増加により、1/30まで低下する危険性があると指摘する³⁾。近年、気候変動に起因すると言われる極端な気象現象が顕著であることから、想定を上回る洪水への備えが急務である。

一方、我が国は65歳以上の高齢者が現在23%から50年後に40%に増加し他国に例がない高齢化社会が到来し、少子高齢化に伴う社会福祉費の増加で、新たな社会資本の更新や整備が難しくなる懸念がある。

これらの背景から、河川の洪水被害について効率的・効果的な対策が求められ、「水害リスク評価」の考えが示され、洪水リスクをハザードや脆弱性から推定し、河川整備の優先順位付けや、避難対策を行う方法が示されている⁴⁾。

そのため本研究では、水害リスク評価におけるリスクを氾濫被害リスクと考え、さらにハザードは降雨、脆弱性は低平地河川と考え、降雨予測情報の活用や、想定を上回る洪水に対し、治水施設の効果や影響を分析するためのツール開発を行うことにより、洪水被害を軽減することを目的としている。

研究の流れは、まず1つ目として、数値予報降雨の適用性に関して分析を行い、次に2つ目として、脆弱性が高い低平地河川における氾濫解析モデルを構築し、最後に3つ目として、超過洪水のリスクに対して氾濫被害を軽減できるような治水施設の運用について分析できる総合的な氾濫解析モデルの作成が不可欠と考え研究開発を行った。

降雨予測技術に関しては、近年のIT技術の向上により、地球全体をモデル化した数値気象予報の技術が進み、気温や気圧などの観測値を初期値として与え、数日先の予測を行うことが可能となり、気象予報において導入がされはじめた。しかし、これらの予測は、例えば集中豪雨、前線、低気圧、台風などの降雨要因に対しての予測精度が不明であり、誤差の範囲も明らかになっていないことから、避難情報や、実際の河川管理施設の管理への適用には至っていない課題がある。

次に、低平地河川のリスクに関しては、河川が低い地盤を流れるため、高い水位が継続することや、いったん堤防が決壊すると浸水範囲や浸水深が大きく

被害が甚大になる。また、本川等からの背水影響を受け、内水氾濫が発生するリスクもある。このように、外水・内水氾濫のリスクに対しては、洪水ハザードマップの作成においても外水を対象にした氾濫解析が主に検討され、樋門や排水機場の操作を考慮した内水・外水を一体化した氾濫解析モデルが十分に構築されていない課題がある。

最後に超過洪水に対する被害軽減に関しては、近年、気候変動に伴い極端な気象現象が発生し、毎年のように洪水被害が発生していることから特に重要な課題である。本研究では、石狩川の支川である千歳川を対象とし、全国的にも前例がない6つの遊水地群を考慮した、遊水池、ダム、樋門、排水機場の複数の治水施設の操作や運用を考慮した氾濫解析により、超過洪水に対する治水施設の総合的な効果について分析した。

1.2 超過洪水による氾濫被害の軽減に関する最近の研究

(1) 水害リスクの研究

自然災害リスクは、一般にリスク＝ハザード×暴露（エクスポージャー）・脆弱性（ヴォルナラビリティ）と定義される^{4), 5)}。水害リスクに置き換えると、**図 1.1** に示すようにリスクは氾濫被害，ハザードは降雨強度，エクスポージャーは一般的に氾濫原の人口や資産が対象である。そして，脆弱性は国土構造，社会構造の2種類により構成され，国土構造の中には市街地や地形や交通インフラ等があり，社会構造の中には過疎化や避難意識の低下等の要因が含まれる。さらに脆弱性の中には，地形的な要因として，低平地を流れる河川の危険性があると考える。低平地河川は，河川水位が人家等の標高より高く，堤防の決壊による外水氾濫や，背水影響による内水氾濫の危険性が高いためである。

以上を踏まえ，氾濫被害を軽減するためには，ハザード（降雨）の予測や脆弱性（低平地河川）を勘案した予測ツールが必要であると考えられる。

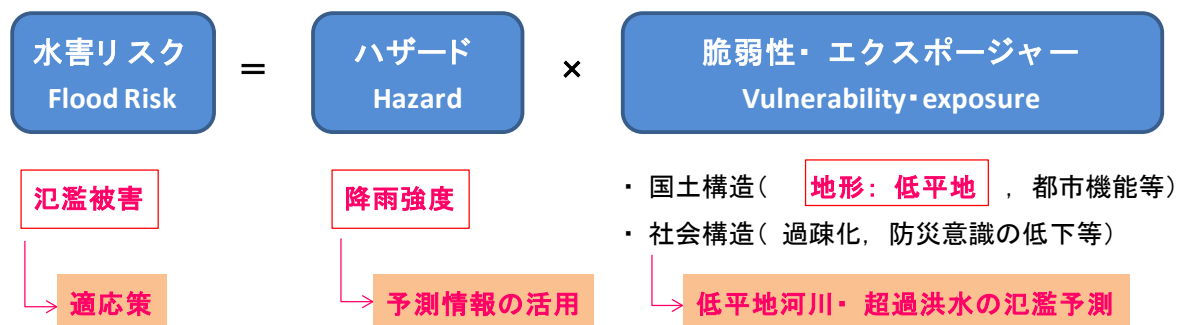


図 1.1 水害リスク評価の考え

(2) 降雨予測の研究

気象分野の数値予報は，1950年代にコンピューターを用いた気象予報がアメリカで開発され，北半球についての計算が行われている⁶⁾。その後，1980年代になり，全球モデルの予報モデルが開発・実用化された。その後，予報モデルは，予測計算の初期値として用いる観測データが，衛星観測，気象レーダー観測，地上気象観測，気球による高層気象観測等によって，水平方向や鉛直方向のデータ密度が拡充されてきた。そして，これらの不規則に分布する観測データは，メッシュデータ化する解析処理が行われ，大量のCPUコアを搭載する高

度計算機により、運動方程式、連続式、熱力学方程式等の支配方程式について数値解析を行う現在の形態に進化した。

現在の数値予報モデルでは、気圧、風速、気温、湿度、降水量が、鉛直に分割された層ごとに出力され、例えば気象庁による GSM モデルの解析では、配信間隔が6時間の1日4回、予測リードタイムは84時間先まで、リアルタイムで配信されている⁷⁾。

数値予報降雨を水災害分野へ適用した研究としては、猪股・川崎⁸⁾らは、アンサンブル予測雨量のダム洪水調節操作への適用に関する研究と題し、米国の降雨予測モデル WRF (Weather Research and Forecasting Model) を用いて、複数のダムを対象に、降雨予測を用いたダム操作に関する研究を行っている。

また、臼谷・中津川⁹⁾は、積算予測雨量に基づいた融雪期におけるダムの洪水調節機能の向上についての研究と題して、積雪寒冷地の豊平峡ダムを対象に、数値予報降雨を用いた事前放流の方法や、融雪期のただし書き操作の回避に予測情報を用いる方法を示している。

さらに、林下・中津川ら¹⁰⁾は、数値予報降雨を活用することによるダムの弾力的運用により、下流河川の環境改善や小水力発電に利用する方法を示した。

上記のように、数値予報降雨については、積算雨量が基礎情報となる、ダム管理への適用例がある。

しかし、近年増加する極端な豪雨に対しての降雨予測情報を適用するには、台風や局地豪雨などの降雨要因別の予測誤差や、適用範囲について十分な検討が必要であると考ええる。

(3)超過洪水対策の研究

近年、これまでの経験を越える豪雨被害が多く発生している。2011年9月には累計雨量が800mmを超える豪雨が紀伊半島で発生し、深層崩壊と言われる大規模な土砂災害が発生した。さらに2012年には九州北部豪雨が発生し、矢部川などの10河川(国管理)でこれまでの最高水位を超えた。2013年には近畿地方で豪雨となり桂川の増水により観光地の嵐山が浸水した。2014年には広島で局地的な集中豪雨が発生し、土砂災害で80名以上の方が亡くなる被害があった。最近では、2016年8月の北海道豪雨は2週間に4つの台風が上陸接近する異例の事態が発生し猛烈な豪雨となった。このような毎年のように計画を上回る洪水被害が頻発して発生している。さらに、2011年3月11日の東日本大震災(東北地方太平洋沖地震)は、想定をはるかに超える規模の津波が発生し、計画を上回る自然災害に対する適応を如何にすべきか、防災に係る技術者・研究者にとって重要なテーマとなったと考える。

以上より超過洪水対策に関する研究は、最近の主要なテーマであり、研究が鋭意されている段階と考える。その中でも、江蔵・手計ら¹¹⁾は、新しい超過洪水波形の作成方法の提案及び基本高水ピーク流量の問題点の検討と題して、洪水波形全体や、ピークに重点をおく洪水波形、長時間降雨が降り続く場合を想定した超過洪水波形の作成方法について提案した。

また、三石ら¹²⁾は超過洪水等に対する合理的な洪水調節手法に関する研究と題して、新規ダム of 積極的な建設が困難な情勢にある中、今度地球温暖化や極端な気象現象に対して、降雨予測や VR 方式 (Water storage Volume with the Ratio of discharge to the flow method: ダムの空き容量で貯留できない場合に、逐次放流量を増加していく操作方式) の活用による、ダムの操作を提案し、治水安全度を向上させる方法を提案した。

田端・福岡¹³⁾らは、超過洪水時における堤防破堤確率評価手法に関する研究と題して、H. W. L から堤防天端高までの余裕高を使って流下する場合、堤防裏法面の浸潤線位置が高くなることから破堤確率が增大することを明らかにした。

上記に示したように、超過洪水に関する研究は、ダム操作への適用、超過洪水の波形に関する方法、堤防リスク等の分野でされはじめた。

ただし、超過洪水により、流域全体の洪水のようすや、複数ある治水施設の機能がどこまで機能するかについて総合的な評価を検討した研究事例は多くない現状である。

1.3 論文の構成

論文構成は、全6章で構成する。全体の流れについて図1.1に示す。また、洪水現象（降雨現象，氾濫現象）に対応する本論文の章について，図1.2に概念図を示す。

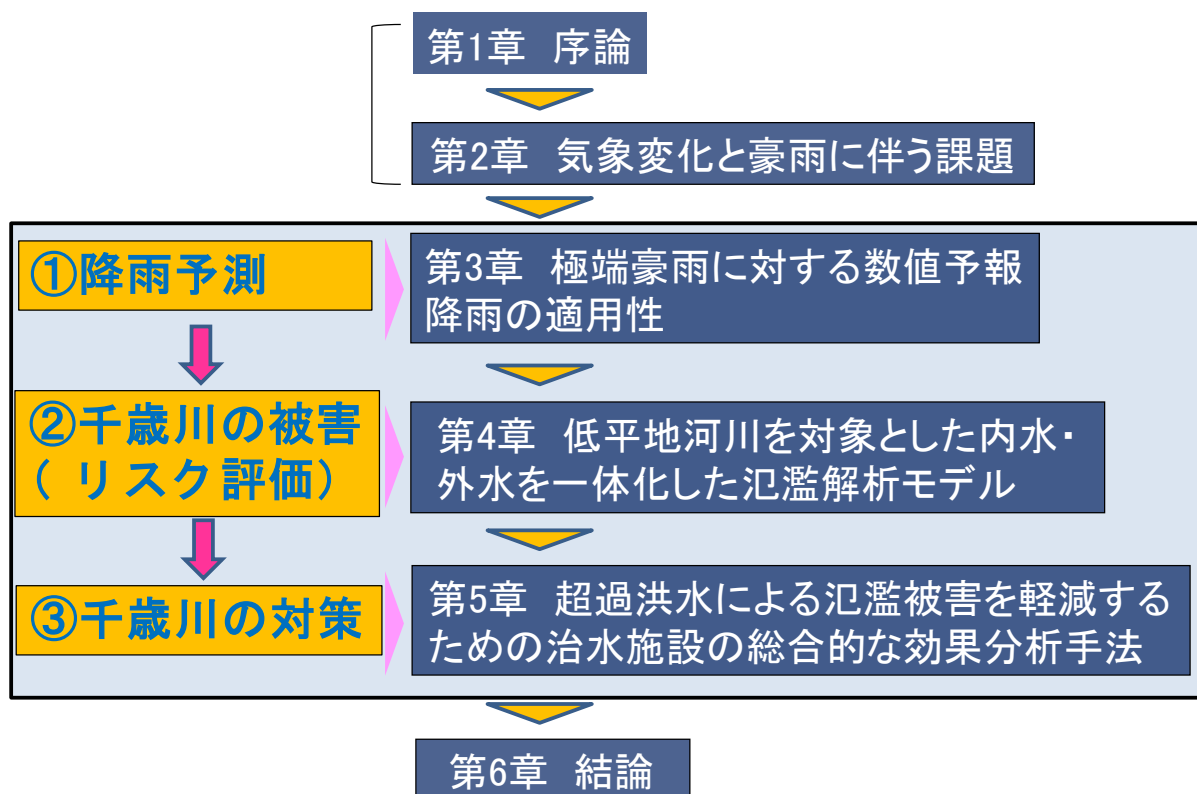


図 1.1 論文の構成

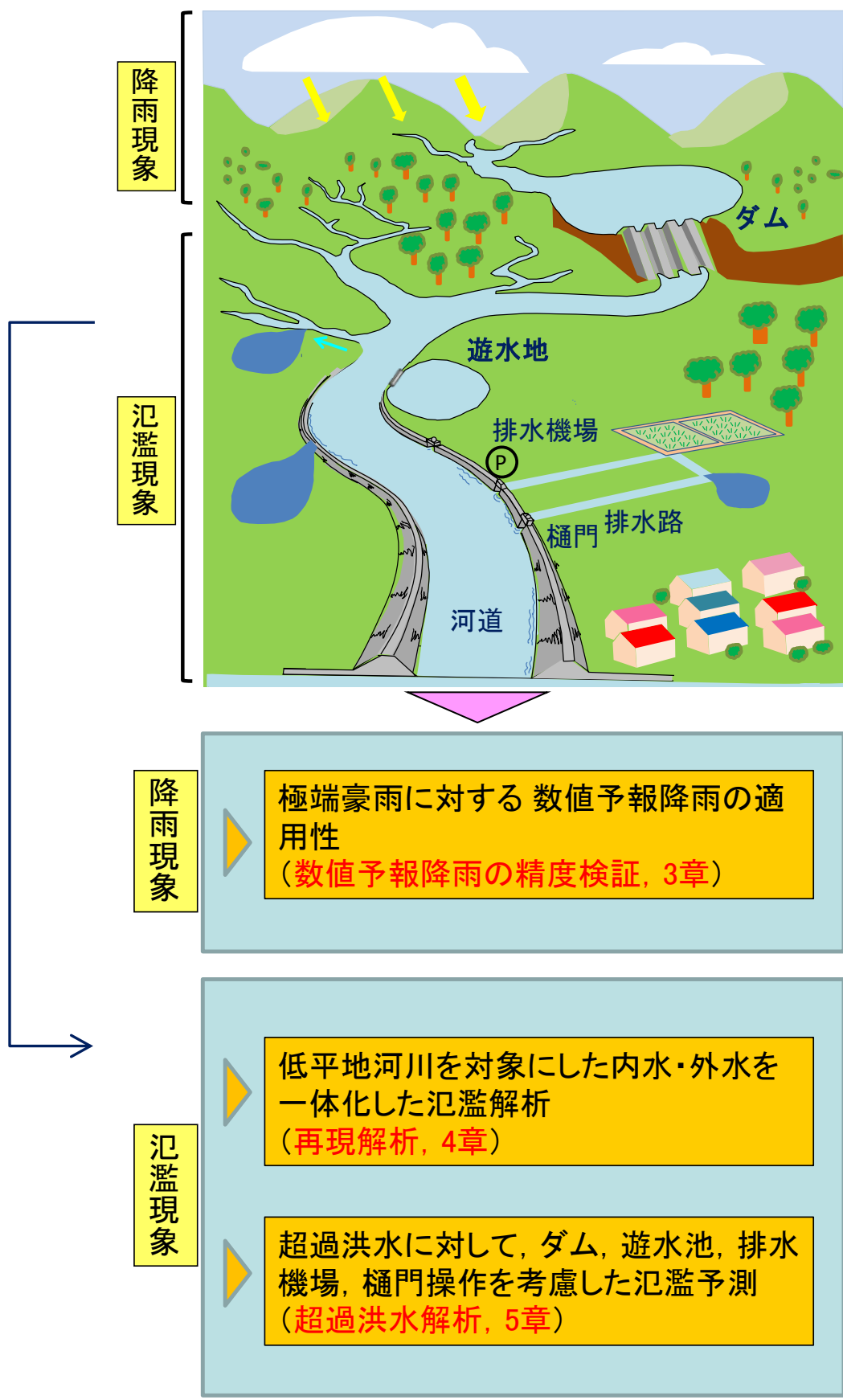


図 1.2 論文構成の詳細

1.4 参考文献

- 1) 国土交通省 社会資本整備審議会：水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について, pp. 17-19, 2008. 6.
- 2) IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In Climate Change 2013: The Physical Science Basis.
- 3) IPCC, Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Barros, V. R., et al. (eds), Cambridge University Press, 1132pp, 2014.
- 4) 国土交通省 水管理・国土保全局：国土交通省 河川砂防技術基準 調査編 第9章 水害リスク評価, 第9章, pp. 1-6, 2014. 4.
- 5) 国交省資省 国土強靱化推進本部：大規模自然災害等に対する脆弱性の評価の結果, pp. 1-45, 2014. 4.
- 6) 気象庁 予報部：数値予報の基礎知識－数値予報の実際－, pp. 1-25, 2005.
- 7) 気象庁 HP：<<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-4.html>> (アクセス日：2019/4/10)
- 8) 猪股広典, 川崎将生, 後藤祐輔, 増田有俊, 荒木千博, 荒木孝之：アンサンブル予測雨量のダム洪水調節操作への適用に関する研究, 水文・水資源学会誌, Vol. 28, No. 6, pp. 278-290. 2015.
- 9) 臼谷友秀, 中津川誠：積算予測雨量に基づいた融雪期におけるダムの洪水調節機能の向上について, 土木学会論文集 B, Vol. 66, No. 3, pp. 268-279, 2010. 8.
- 10) 林下直樹, 中津川誠, 臼谷友秀：降雨予測リードタイムの延長による多目的ダムの弾力的管理の向上, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 70, No. 4, I_1471-I_1476, 2014.
- 11) 江蔵拓, 小川厚次, 手計太一：新しい超過洪水波形の作成方法の提案及び基本高水ピーク流量の問題点の検討, 土木学会論文集 G(環境), Vol. 69, No. 5, I_131-I_136, 2013.
- 12) 三石真也, 尾関敏久：超過洪水等に対する合理的な洪水調節手法に関する研究, 国土技術政策総合研究所資料, NO. 670, 2012.
- 13) 田端幸輔, 福岡捷二, 瀬崎智之：超過洪水時における堤防破堤確率評価手法に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol. 71, No. 4, I_1273-I_1278, 2015.

第2章 気象変化と豪雨に伴う課題

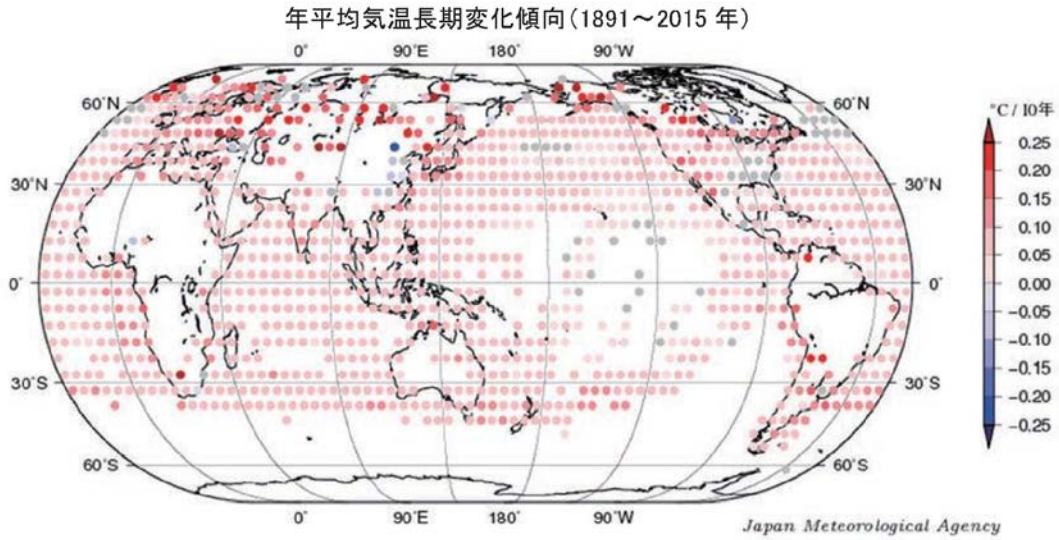
2.1 日本における気象変化

(1) 気温の変化

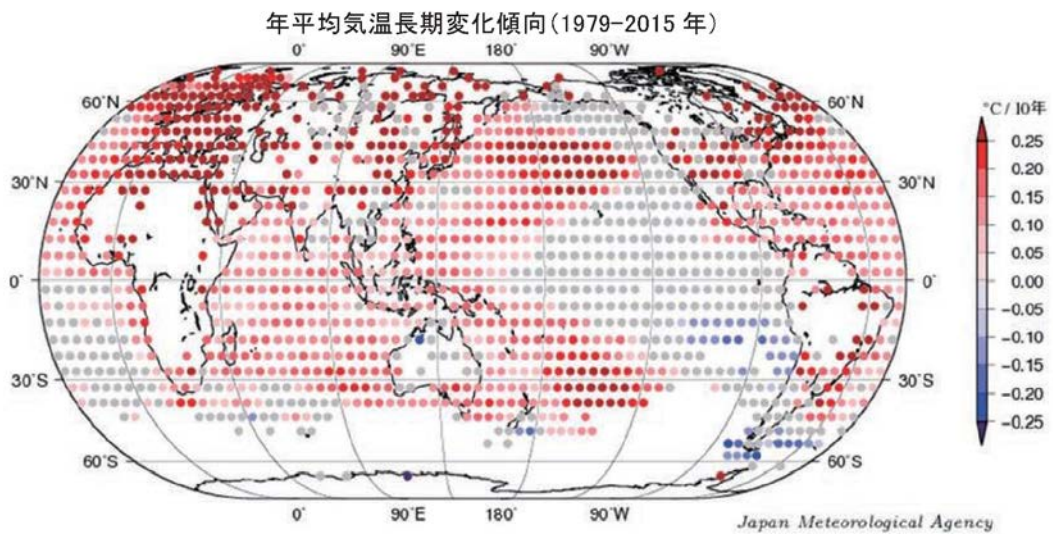
世界の気温上昇は、[図 2.1^{1\)}](#)に示すように、1981～2015年の約120年間で見ると0～0.15℃程度上昇したエリアが多く分布する。一方、近年、1979～2015年の約40年間では1.5～0.25℃上昇したエリアが多く分布し、近年30年で気温上昇が急速に進行していることが把握できる。

また、日本における平均気温の上昇量は、ヒートアイランドの影響が少ない観測地点で平均し算出した結果、変動を繰り返しながら、1.16℃上昇している([図 2.2^{1\)}](#))。気温の上昇は、海水等の水蒸気量が増加し、大気中に水蒸気量が増加する。しかし、大気中に存在できる水蒸気量には限界があるため、急激な降水の要因になることが懸念されている。

約 120 年間の気温変化



近年約 30 年の気温変化



上図は 1891~2015 年、下図は 1979~2015 年の期間の変化傾向で、10 年あたりの変化量で示している。灰色は変化傾向が見られないことを示す。図中の丸印は、 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 格子で平均したそれぞれの期間（上図：1891~2015 年、下図：1979~2015 年）の長期変化傾向（10 年あたり）を示す。灰色は信頼度 90% で統計的に有意でない格子を示す。

図 2.1 年平均気温の変化傾向¹⁾

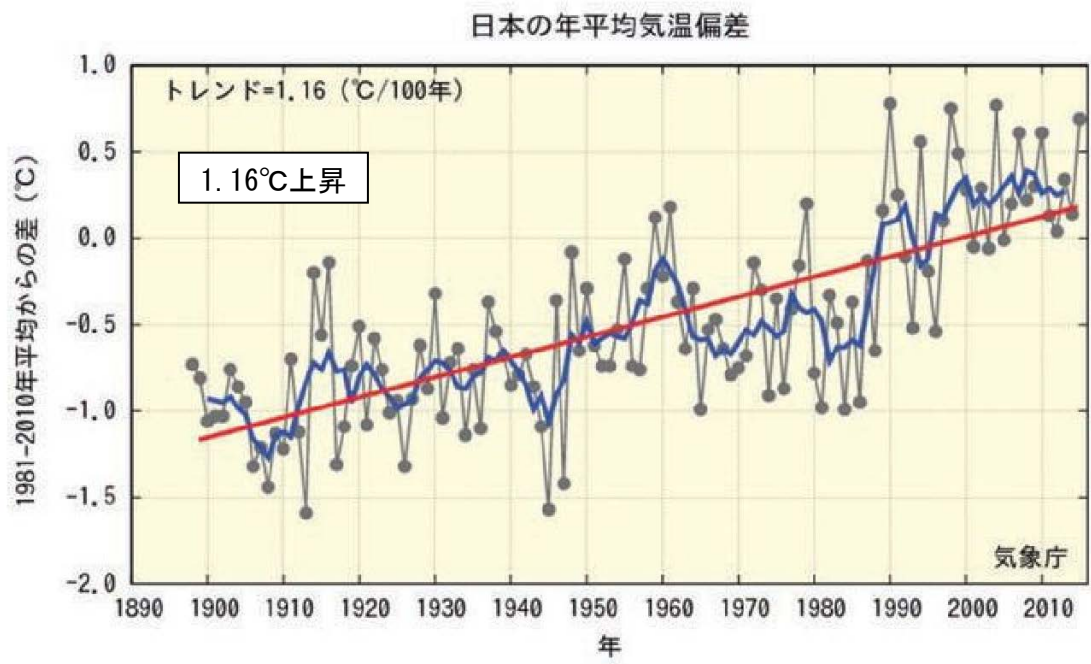


図 2.2 日本の平均気温の変化¹⁾

また、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第 5 次評価報告書(2013～2014)²⁾では、1950 年以降、多くの極端な気象・気候現象の変化が観測され、今後も降水はより強くなる可能性が高いことが示唆されている（図 2.3）。

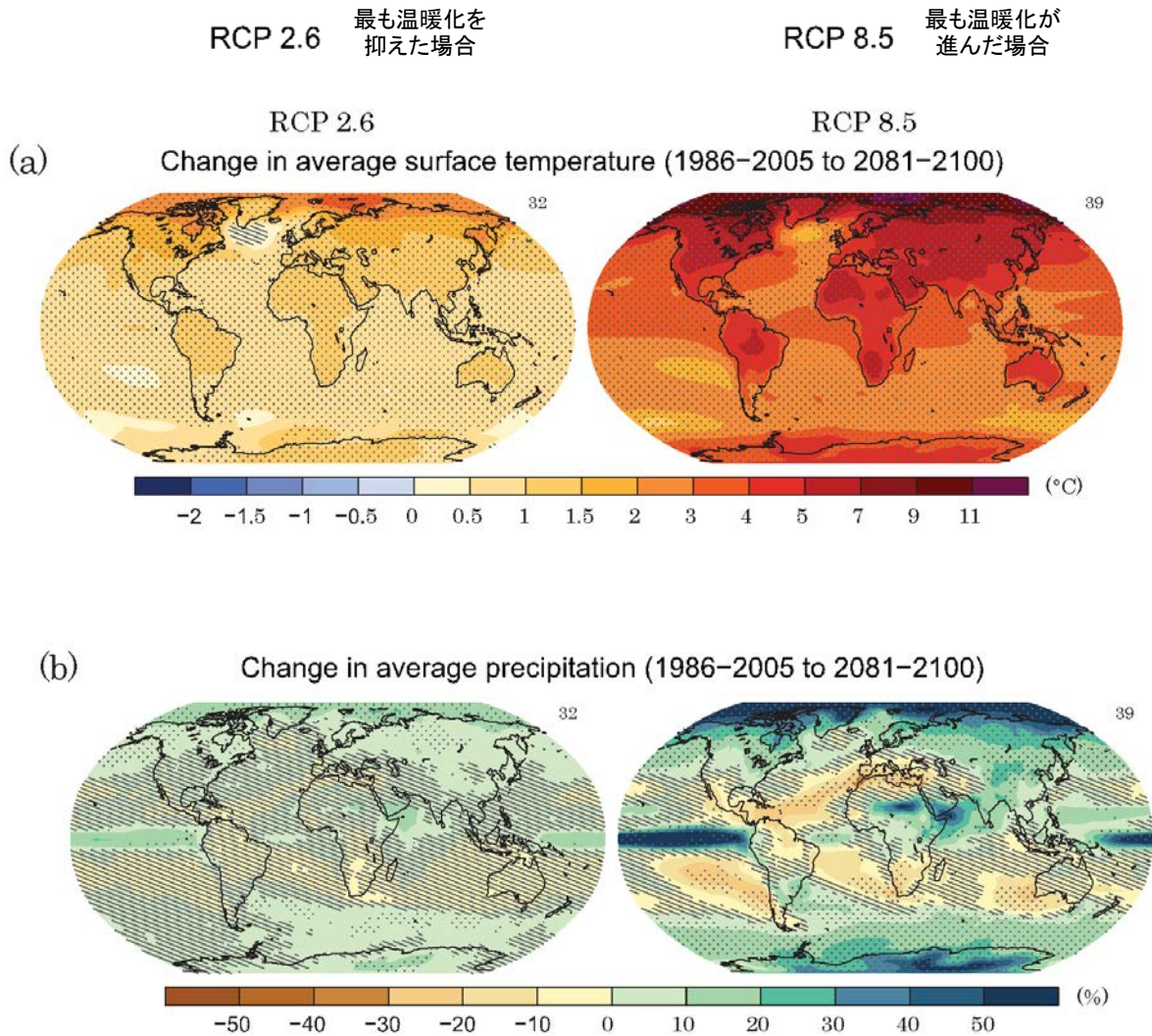


図 2.3 IPCC RCP2.6 および 8.5 シナリの気温と降水量の増加率
(IPCC 第 5 次評価報告書)²⁾

(2) 降雨の変化

気象庁が整理した大雨の発生頻度について図 2.4(1), (2)に示す¹⁾. 時間雨量が 50mm 以上の発生頻度は 40 年前に対して 3 割程度増加し, 80mm 以上の発生頻度は 4 割程度に増加傾向である¹⁾. このような降雨の変化により, 洪水や土砂災害の発生頻度が増加している. 図 2.5 に国土交通省が整理した, 時間雨量が 50mm 以上の発生回数と土砂災害の発生件数の関係を示す³⁾. 豪雨・土砂災害ともに近年 10 年の増加割合が高くなっている実態がある.

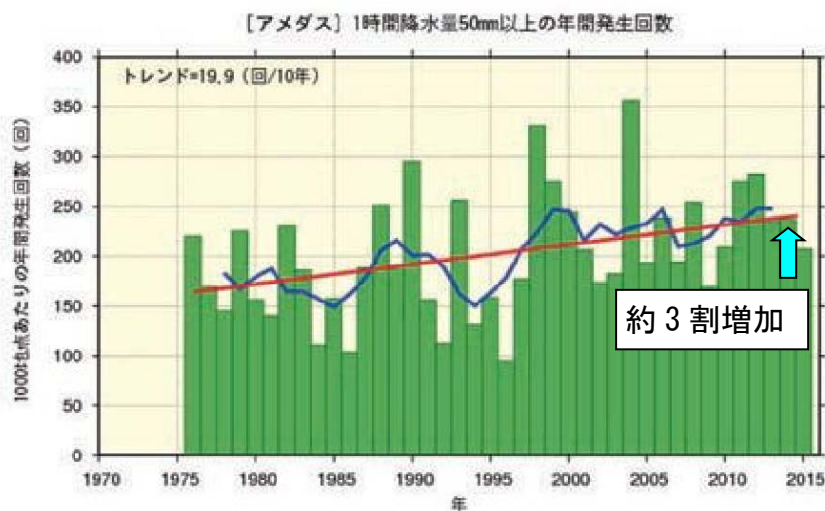


図 2.4(1) アメダス地点で 1 時間降水量が 50mm 以上の年間頻度 (1,000 地点あたり)

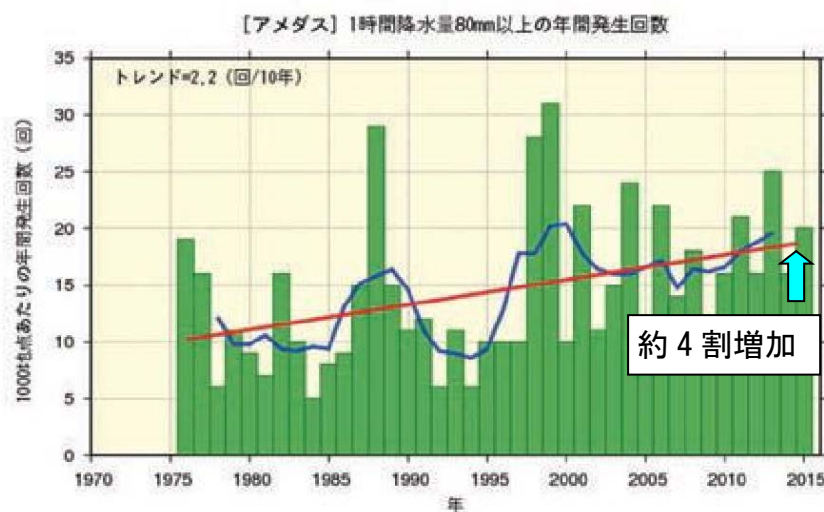


図 2.4(2) アメダス地点で 1 時間降水量が 80mm 以上の年間頻度 (1,000 地点あたり)

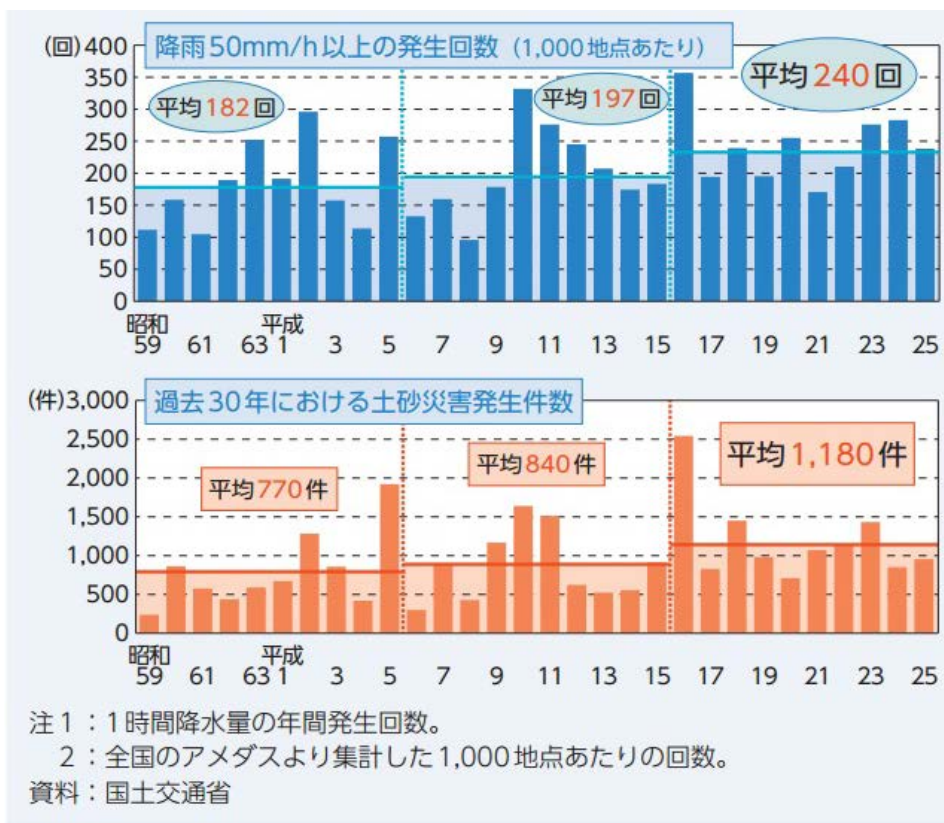


図 2.5 豪雨と土砂災害の発生数の推移³⁾

日本に上陸および接近した台風の数については、気象庁のデータ⁴⁾より整理したところ、明確な変化はみられない(図 2.6)が、1970 年以降で見ると、2004 年に 10 個の台風が上陸した年が多く、2016 年はそれに次いで台風の上陸数が多かった。台風については、日本周辺で前線と連動し豪雨となることや、接近・上陸のルートによって湿った水蒸気が継続的に供給されるバックビルディング現象によって洪水等の被害を拡大させることが近年報告されている。

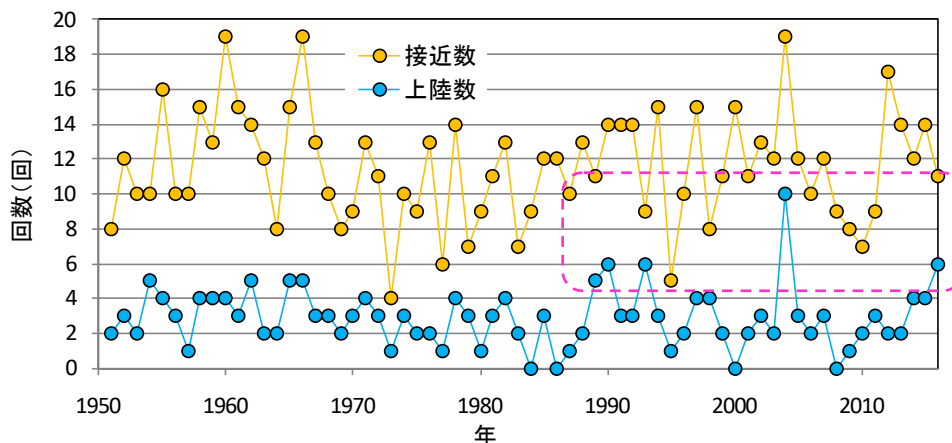


図 2.6 日本に上陸・接近した台風の数

国道274号 日高町 岩瀬橋 (H28.9.1の状況)



⑦国道274号 日高町 道路調査の状況 (H28.9.4)



④国道274号 日高町 三国の沢覆道 (H28.9.3の状況)



農業被害



台風11号による大雨で常呂川がはんらんし、水に流された収穫前のタマネギ=北海道北見市岸
2016年8月22日、山田泰雄撮影

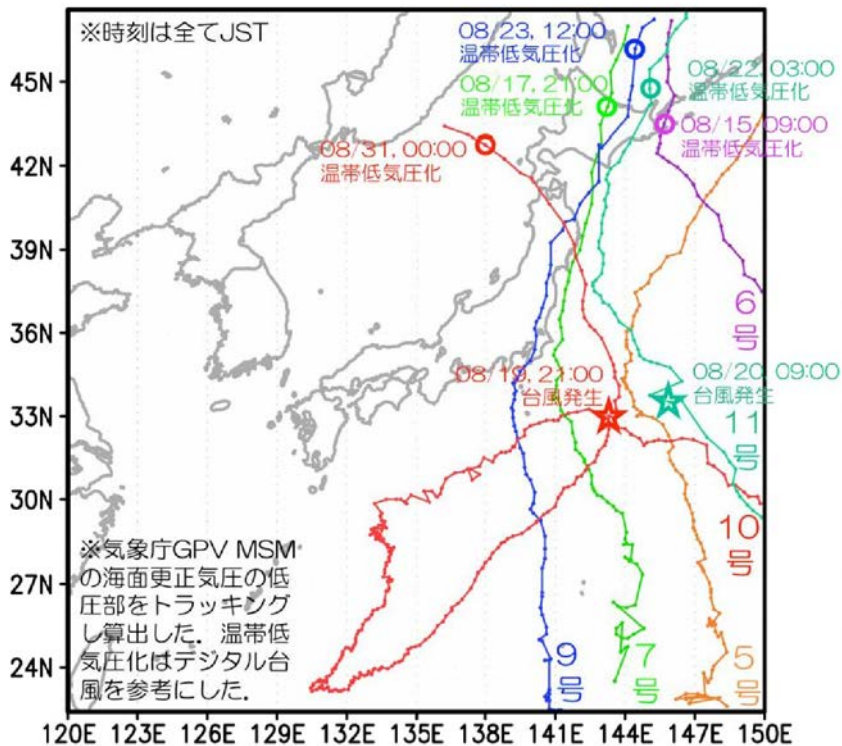
毎日新聞



図 2.8 2016年8月北海道豪雨の概要^{6), 7), 8)}

(2) 降雨特性

気象庁が1951年に台風の統計を開始以来、北海道に台風が3個上陸したことは無く、また台風10号は太平洋側から東北地方へ上陸するという初めてのコースをとった(図2.9)⁵⁾。太平洋ルートを經由し、北海道を經由する場合、日本海ルートや、本州縦断ルートに比べ、気圧が弱体化しづらい報告がある⁵⁾。



2016年8月に北海道を上陸もしくは周辺を通過した台風の経路。気象庁GPV MSMの海面更正気圧の低圧部を1時間おきにトラッキングし算出した。発生・温帯低気圧化はデジタル台風を参考にした。図中☆印は台風発生地点、○印は温帯低気圧化した地点

図 2.9 2016年8月北海道豪雨の台風経路⁵⁾

総雨量を図 2.10⁵⁾、11⁵⁾に示す。台風7号、11号、9号の総雨量は、北海道のほぼ全域で 300mm 程度の降雨が分布し、道内のあらゆる地域で洪水による被害が発生し、このような広域な範囲の洪水に対して、ダムや複数ある樋門等の河川管理施設の操作・運用や避難誘導など、きめ細やかな対応は難しくなる課題があると考える。

また台風10号は、北海道に上陸はしなかったにも関わらず、500mm 以上にもなるこれまでに経験したことのない規模の豪雨である。台風7号、11号、9号が、前線と台風の組み合わせによるパターンであるのに対して、台風10号が太平洋から上陸し、日高山脈に南東風を吹かせた地形性豪降雨による降雨パターンであった⁵⁾。このようなルートによる台風は、今後も発生することが考えられ、これまでの経験を越える大雨に対しての備えが急務であると考える。

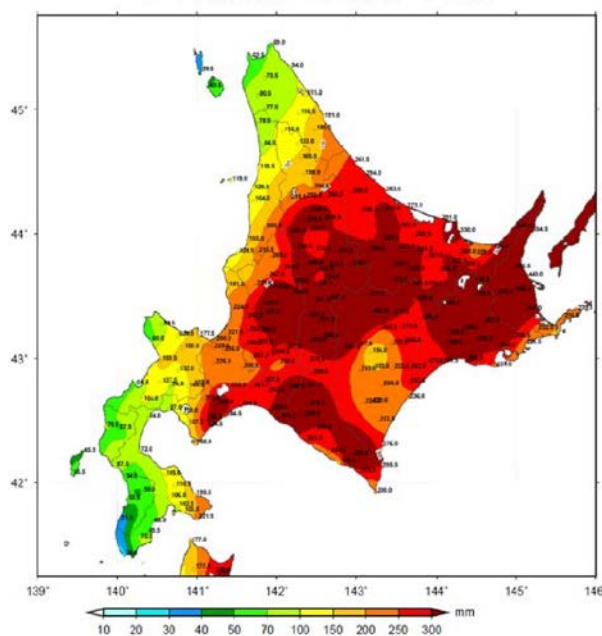


図 2.10 台風7号、11号、9号の総雨量⁵⁾
(8月15日1時～24日24時の)

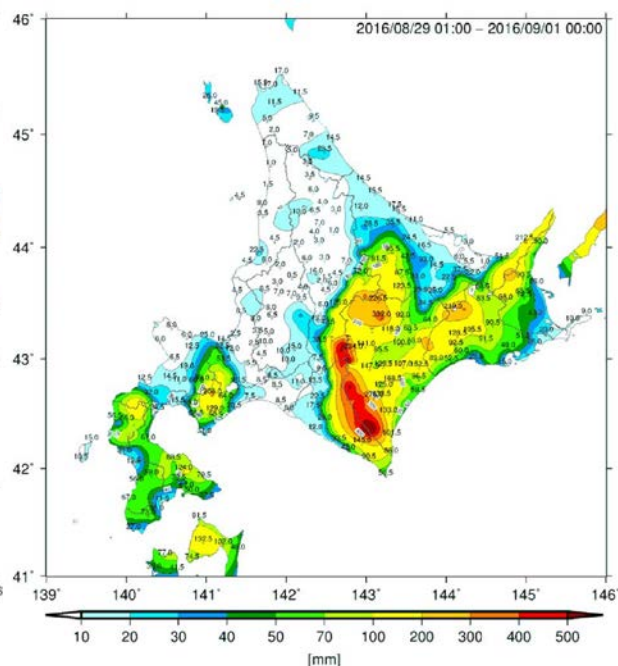


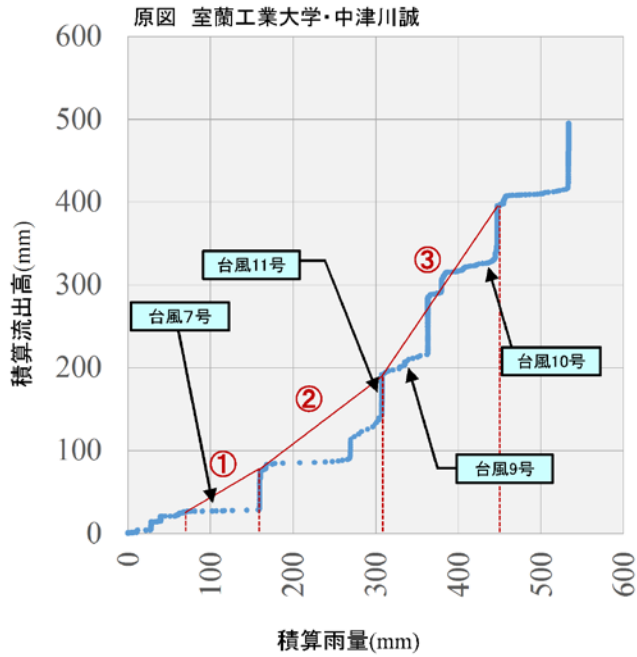
図 2.11 台風10号の総雨量⁵⁾
(8月29日1時～9月1日0:00)

(3) 降雨と流出

2016年8月の北海道豪雨では、連続する降雨により流域が湿潤状態になり、流出量が増大した。中津川⁵⁾は、常呂川流域や空知川流域において、積算雨量と積算流出高の関係を示し、台風7号と11号の流出率が0.5~0.7程度であるのに対し、1週間ほど後に接近した台風10号の流出率は1.0を上回る値を示す結果であった⁵⁾。

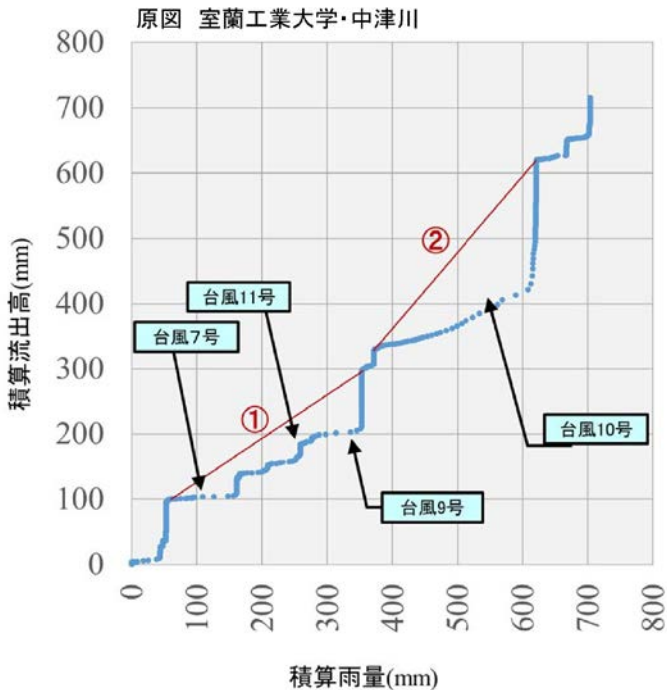
以上のことより、これまでと同規模の台風が上陸した場合でも、台風が連続して上陸・接近した場合には、流出量が増大する危険性があることを示唆した。今後の洪水対策は、このような気象条件や流出率の変化を勘案し、既存の堤防やダムなどの防災施設能力の向上を含むハード対策、または治水施設の操作・運用の見直しや、効果的な避難方法を含むソフト対策についての検討する必要があると考える。

<常呂川>



- ① 台風7号による降雨
(8月17日3時～8月19日15時)
$$\frac{\sum Q}{\sum R} = \frac{49mm}{92mm} = 0.5$$
- ② 台風11号による降雨
(8月19日16時～8月22日15時)
$$\frac{\sum Q}{\sum R} = \frac{117mm}{147mm} = 0.8$$
- ③ 台風9・10号による降雨
(8月22日16時～9月6日9時)
$$\frac{\sum Q}{\sum R} = \frac{202mm}{137mm} > 1.0$$

<空知川>



- ① 台風7号・11号・9号による降雨
(8月16日13時～8月25日23時)
$$\frac{\sum Q}{\sum R} = \frac{198mm}{298mm} = 0.7$$
- ② 台風10号による降雨
(8月28日19時～9月5日8時)
$$\frac{\sum Q}{\sum R} = \frac{285mm}{249mm} \approx 1.0$$

図 2.12 流出率の変化⁵⁾

2.3 豪雨災害とその課題

豪雨災害とその課題を以下に整理する。

- (1) 全国で発生する時間雨量が 50mm や 80mm の集中豪雨の発生頻度が増加しており，このような極端な降雨現象の変化により，洪水や土砂災害が頻発化していることが課題である。

- (2) 2016 年北海道豪雨の台風 7 号，11 号，9 号が広域な範囲の豪雨であった。また，台風 10 号はこれまでの経験を超える量の豪雨であったが，このような前例の無い豪雨が発生した場合でも，氾濫被害を最小化する方法が十分に確立されていないことが課題である。

2.4 課題解決の方向性

豪雨災害や今後の気候変動の適応策を考えるうえでの課題解決の方向性についての概念図を図 2.13 に示す。洪水リスクの評価は、ハザードと脆弱性が基本であるため、ハザードとして大雨対策、脆弱性として氾濫被害が大きい低平地河川の対策について、水文や水理モデルにより定量的な評価を行う。

はじめに、大雨対策の課題に対しては、降雨予測情報の活用を考えた。具体的には、近年、日本全国で発生した豪雨を対象に、技術進歩が目覚ましい数値気象予報モデルで計算された予報降雨と実績降雨を比較し、予測の再現性を検証する。この検証については、ダムの事前放流や防災情報への活用を踏まえ、予測降雨をどうすれば適用できるかについて分析する。

次に、洪水のリスク評価については、低平地河川を対象に、内水や外水氾濫、さらにダム操作、樋門操作、排水機場のなどの河川管理施設を考慮した氾濫解析を構築し、実態に即した氾濫現象を再現する。これにより、気候変動の影響に伴う計画を上回る洪水について、予測や対策を検討できるモデルを構築する。

最後に、これまでの経験を越える大雨に対して、気候変動に伴う超過洪水を想定し、ダム、遊水地群、排水機場、樋門といった治水施設の運用を考慮した氾濫解析を行う。これにより、超過洪水に対する治水施設の効果を把握し、今後重要になる検討や対策についての明らかにする。

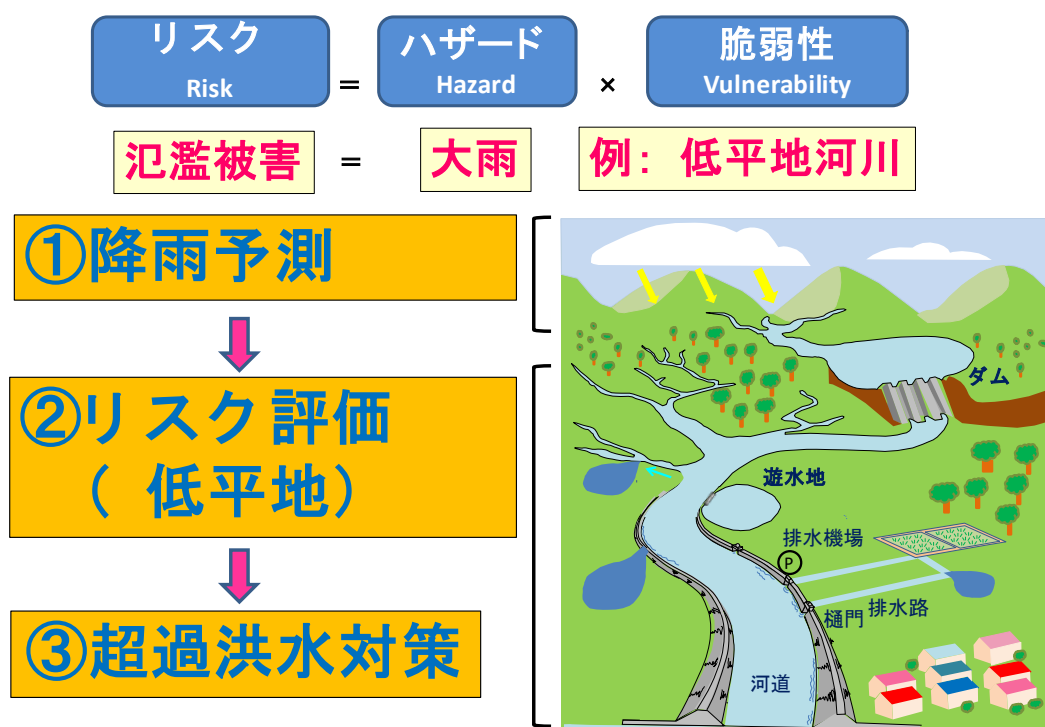


図 2.13 課題解決の方向性

2.5 参考文献

- 1) 気象庁：気候変動監視レポート 2015 世界と日本の気候変動および温室効果ガスとオゾン層等の状況, pp.1-33, 2015.
- 2) IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In : Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 22p, 2013.
- 3) 環境省 環境白書：第1章 環境・経済・社会の現状と、持続可能な地域づくりに向けて
<<https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h27/html/hj15010101.html>>
(アクセス日 2017/4/11)
- 4) 気象庁：台風の詳細資料
<<http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typhoon/statistics/index.html>>
(アクセス日 2017/4/11)
- 5) 土木学会 社会支援部門：2016年8月 北海道豪雨災害調査団緊急報告会について<<http://committees.jsce.or.jp/report/node/136>> (アクセス日：2017/4/11)
- 6) 北海道開発局:災害・防災情報
<<http://www.hkd.mlit.go.jp/ky/jg/bousai/ud49g7000000o5ac.html>> (アクセス日 2017/4/11)
- 7) J R北海道:一連の 台風による被害状況等について
<www.jrhokkaido.co.jp/press/2016/160902-2.pdf> (アクセス日 2017/4/11)
- 8) 毎日新聞：北海道産野菜ピンチ，畑は冠水，食品工場は浸水
<<http://mainichi.jp/graphs/20160910/hpj/00m/040/003000g/3>> (アクセス日 2017/4/11)

第3章 近年発生した極端豪雨に対する

数値予報降雨の適用性

3.1 数値予報降雨の概要

気象庁による気象モデル¹⁾には、GSM (Global Spectrum Model) , MSM (Meso Scale Model) などが存在し、近年は LFM (Local Forecast Model) の配信が開始された (図 3.1) . GSM は、約 20km メッシュの全球モデルで、台風や梅雨前線などの比較的大きなスケールの現象を対象にしたモデルである。また、MSM は、約 5km メッシュの日本周辺を対象にしたモデルで、集中豪雨などの台風や前線よりもスケールの小さな現象を対象にした予測モデルである。LFM については、さらに局地的な現象を対象としている。

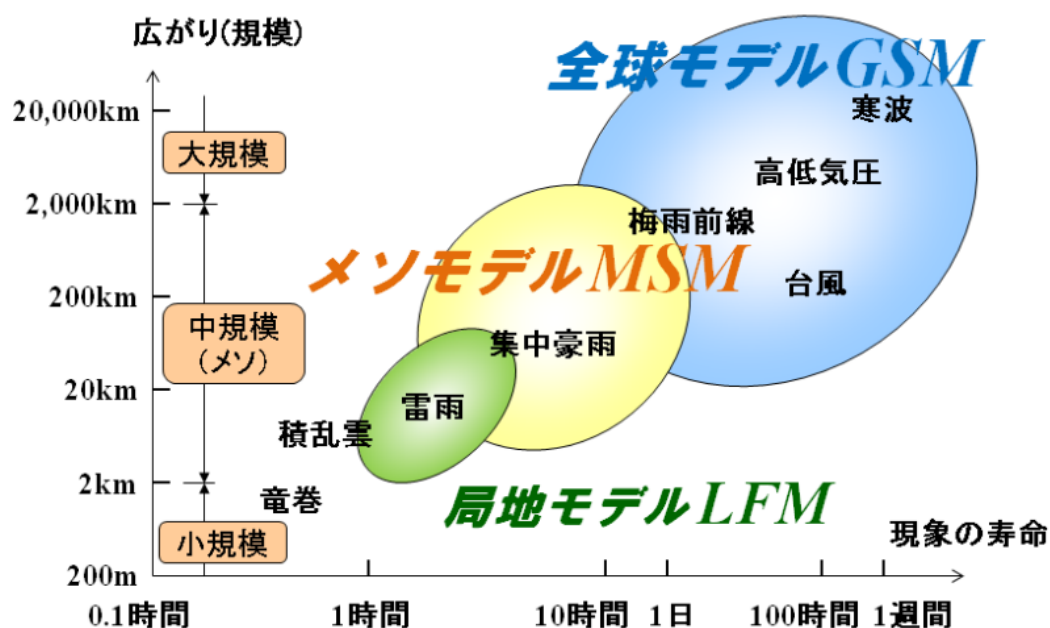


図 3.1 気象予報モデルの種類¹⁾

それぞれの数値予報モデルの概要¹⁾を表 3.1 に整理した. この中で, GSM, MSM のメッシュ分割図について, GSM を図 3.2 に, MSM を図 3.3 に示す. これらは, メッシュサイズの違いに加え, 予測の先行時間 (リードタイム) が異なる. これは, メッシュサイズを細分化していくと, 高度計算機の計算処理能力の関係からリードタイムが短くなるためである.

このことは, 予測降雨の適用を考えた場合, 例えばダム管理への適用では, リードタイムが長ければ, その分だけ事前放流を行い, ダムの空き容量を空けることができ, 治水能力を向上できる. また, 避難情報への適用を考えると, 台風・低気圧・集中豪雨など様々な降雨に対して精度を把握した上で適用する必要があるが, 降雨要因ごとの精度が明らかになっていない課題がある.

そこで本研究では, 避難情報やダム管理などの河川管理施設への適用を踏まえた活用を見据え, GSM, MSM の 2 種類のモデルを対象に降雨予測の精度について検証し, 誤差範囲を推定した.

表 3.1 数値予報モデルの概要¹⁾

	VSRF (降水短時間 予報)	GSM (全球モデル)	RSM (領域モデル)	MSM (メソモデル)	LFM (局地モデル)
水平解像度 (メッシュ サイズ)	約 1km	約 20km	約 20km	約 5km	約 2km
先行時間 (リード タイム)	6 時間	84 時間	51 時間	33 時間 (H25.5 から 39 時間)	9 時間
配信間隔	1 日 48 回 (0.5hr)	1 日 4 回 (0,6,12,18)	1 日 2 回 (9,21)	1 日 8 回 (0,3,6,9,12, 15,18,21)	毎時
データの配信 期間	2005 年～現在	2007.11 ～現在	～2007 年 (廃止)	2006.3～現在	2014 年 3 月 27 日～

本研究で対象

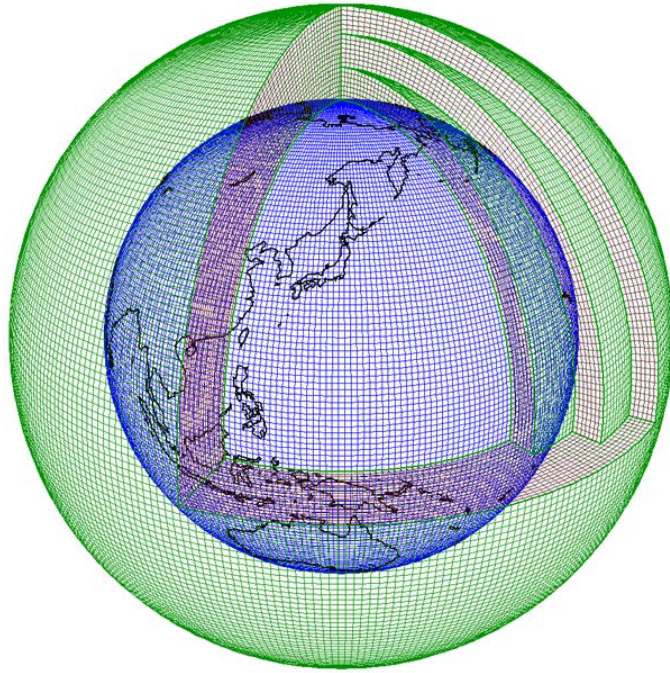


図 3.2 GSM のメッシュ分割図²⁾

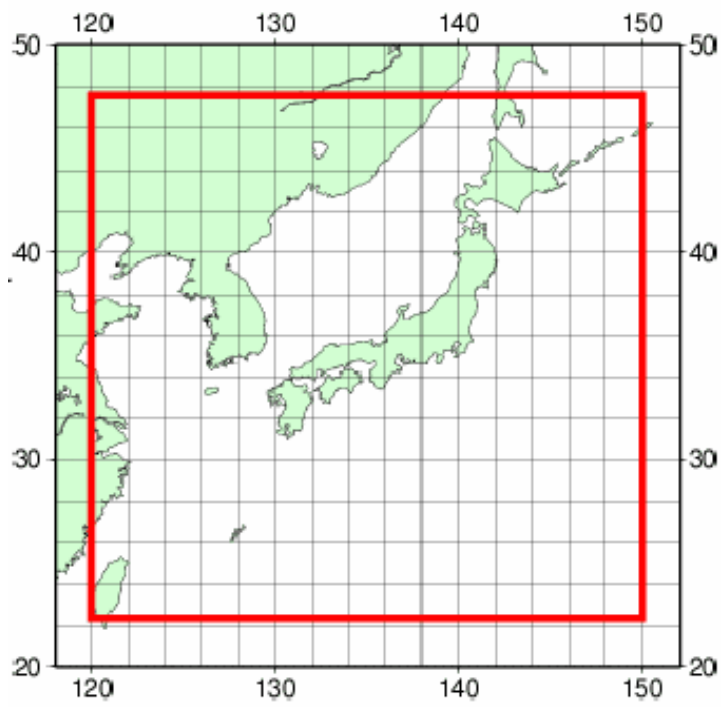


図 3.3 MSM のメッシュ分割図³⁾

3.2 対象降雨

対象降雨は、近年日本全国において発生した極端な豪雨から、台風事例、低気圧事例、局地豪雨事例を網羅するよう選定した。対象洪水の位置図を図 3.4 に示す。対象降雨の内訳は、局地豪雨が 4 事例、台風が 3 事例、低気圧のもたらず大雨が 1 事例と様々な降雨要因が含まれるようにした、

対象洪水の選定期間は、数値予報降雨が利用可能となった年以降とした。対象とした流域面積は、局地豪雨のスケールを勘案し、概ね $10^1 \sim 10^2$ (km²) のオーダーとした。

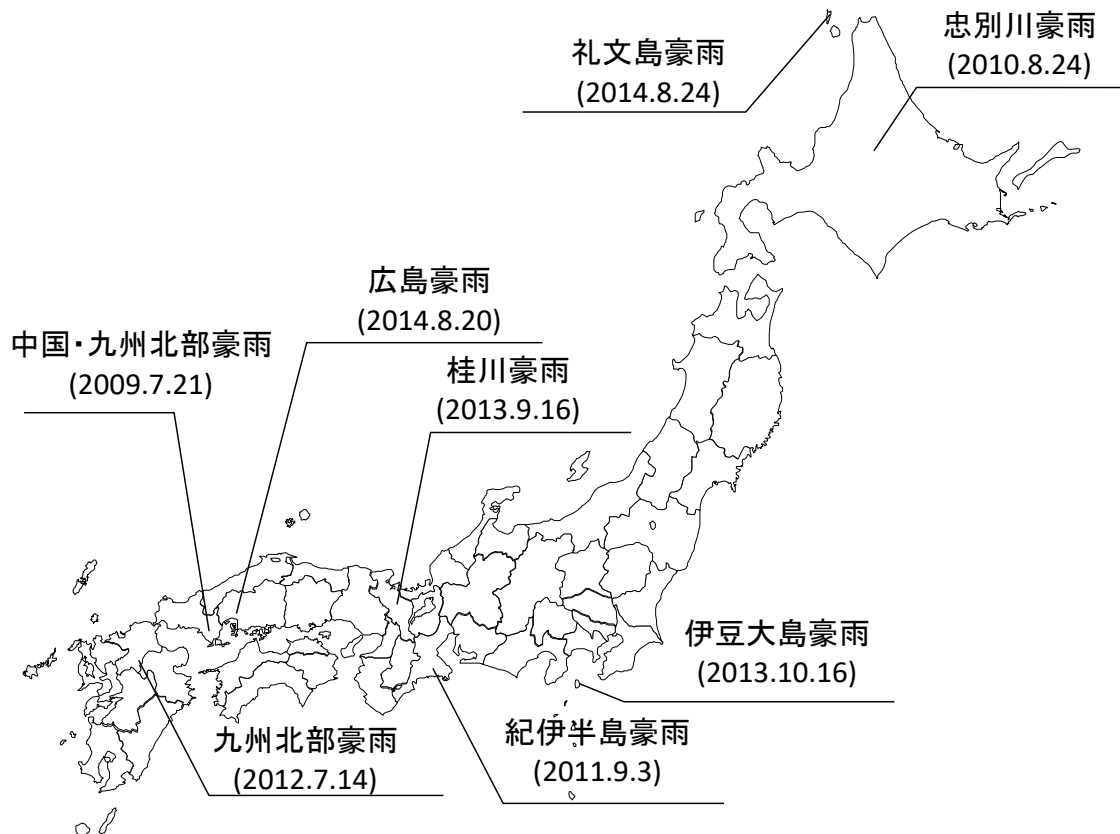


図 3.4 対象流域事例の位置図

対象降雨の発生要因，災害の概要について，図 3.5，表 3.2^{4), 5), 6), 7), 8), 9)} に整理した。黄色が台風事例，水色が局地豪雨事例，ピンクが低気圧事例を示している。



図 3.5 対象流域事例の要因（台風，局地豪雨，低気圧）

表 3.2 対象降雨の発生要因と災害の概要 ^{4), 5), 6), 7), 8), 9)}

	年月日	降雨名称	発生要因	災害の概要
1	2009.7.21	中国・九州北部豪雨	線状降水帯 (梅雨前線)	平成 21 年 7 月 20 日～21 日に発生した梅雨前線による局地豪雨で、線状降水帯が発生した。 <u>防府市の特別老人養護施設の土砂災害が発生した。</u> 防府市では、死者が 14 名、山口県内で 159 件発生した。
2	2010.8.24	忠別川豪雨	線状降水帯 (低気圧)	平成 22 年 8 月 23 日～24 日に発生した低気圧による局地豪雨で、線状降水帯が発生した。石狩川支川の忠別ダム上流では、道路橋が陥没し死者 3 名、忠別ダム上流の <u>天人峡温泉にいた約 300 名が孤立した。</u>
3	2011.9.3	紀伊半島豪雨	台風12号	平成 23 年 9 月 1 日～4 日に発生した台風 12 号による豪雨で、台風が大型で動きが遅く長時間の豪雨であった。この豪雨により、 <u>深層崩壊型の土砂災害が発生し、</u> 紀伊半島では死者行方不明者は 84 名に及んだ。
4	2012.7.14	九州北部豪雨	線状降水帯 (梅雨前線)	H24 年 7 月 13 日～14 日に発生した梅雨前線による局地豪雨で、線状降水帯が発生した。矢部川水系など <u>10 河川で既往最高水位突破し、矢部川では破堤が生じた。</u> 福岡、熊本、大分の 3 県の死者行方不明者は 34 名に及んだ。
5	2013.9.16	桂川豪雨	台風18号	平成 25 年 9 月 15 日～16 日に発生した台風 18 号による豪雨である。由良川、桂川などで越水が発生し約 2,000 戸の浸水被害が発生した。特に、 <u>桂川は嵐山で浸水被害が生じ、</u> 浸水面積は 10ha、京都府内の死者は無かった。
6	2013.10.16	伊豆大島豪雨 ¹⁾	台風26号	平成 25 年 10 月 15 日～16 日に発生した台風 26 号による豪雨である。伊豆大島では、 <u>山地の中腹で土砂崩壊が生じ大規模な土石流が発生した。</u> 死者行方不明者が 39 名に及んだ。
7	2014.8.20	広島豪雨	線状降水帯 (秋雨前線)	平成 26 年 8 月 19 日～20 日に発生した秋雨前線による局地豪雨で、線状降水帯が発生した。 <u>広島県安佐南区・北区で土砂災害が発生した。</u> 50 箇所以上で土石流で発生し、74 名が亡くなる未曾有の災害となった。
8	2014.8.24	礼文島豪雨	低気圧	平成 26 年 8 月 23 日～24 日の発生した低気圧による豪雨である。礼文島では少なくとも <u>10 か所以上の土砂崩れ</u> が発生し、トンネルをふさが被害や道路が寸断された。この土砂災害により 2 名が亡くなった。

検証した各ダム流域や土砂災害領域と、雨量観測地点について表 3.3 に示す。観測雨量は、流域内にある雨量観測所を選定し、水文水質データベース（国交省）¹⁰⁾ とアメダス（気象庁）¹¹⁾ を用いた。流域平均雨量は、局所的な流域では雨量観測点が少ないために簡便的に算術平均により算出した。

表 3.3 各流域・領域の観測地点と流域面積

	洪水名称	流域	流域面積	雨量観測所
			km ²	
1	中国・九州北部豪雨	土砂災害発生領域	10.5	真尾、防府
2	忠別川豪雨	忠別ダム流域	238.9	忠別ダム、湧駒別、旭岳、松山、小化雲岳
3	紀伊半島豪雨	猿谷ダム流域	336.0	猿谷、天辻、柞原、九尾、川迫、虻峠
4	九州北部豪雨	日向神ダム流域	84.3	吹原、鯛生
5	桂川豪雨	日吉ダム流域	290.0	殿田、周山、鎌倉
6	伊豆大島豪雨	土砂災害発生領域	91.1	大島、大島北ノ山
7	広島豪雨	土砂災害発生領域	9.9	高瀬
8	礼文島豪雨	土砂災害発生領域	81.0	礼文島、杓形、本泊

※1)中国・九州北部豪雨は、土砂災害発生領域として真尾川、久兼川流域とした。

※2)九州北部豪雨は、日向神ダム流域内のデータがないため、近傍の観測点で平均している。

※3)礼文島豪雨は、土砂災害発生領域をカバーするため、利尻島観測点も使用している。

※4)礼文島・伊豆大島豪雨はアメダスデータ、その他は水文水質データベースである。

検証方法は、各ダム流域や土砂災害領域に対して、数値予報降雨の予測点で囲むように予測のポイントデータ¹²⁾を選定する。ダム流域の例として、桂川豪雨のポイントデータの配置を図 3.5(1)に、土砂災害の例として、広島豪雨のポイントデータの配置を図 3.5(2)に示す。観測地点の雨量については、流域内に概ね含まれる地点を選定する。観測地点による流域平均雨量は、十分な観測地点数が得られない場合には観測地点の近傍地点についても含めて算術平均し、流域平均雨量とし比較を行った。その他の降雨事例のポイントデータの配置は、図 3.5(3)～(8)に示す。

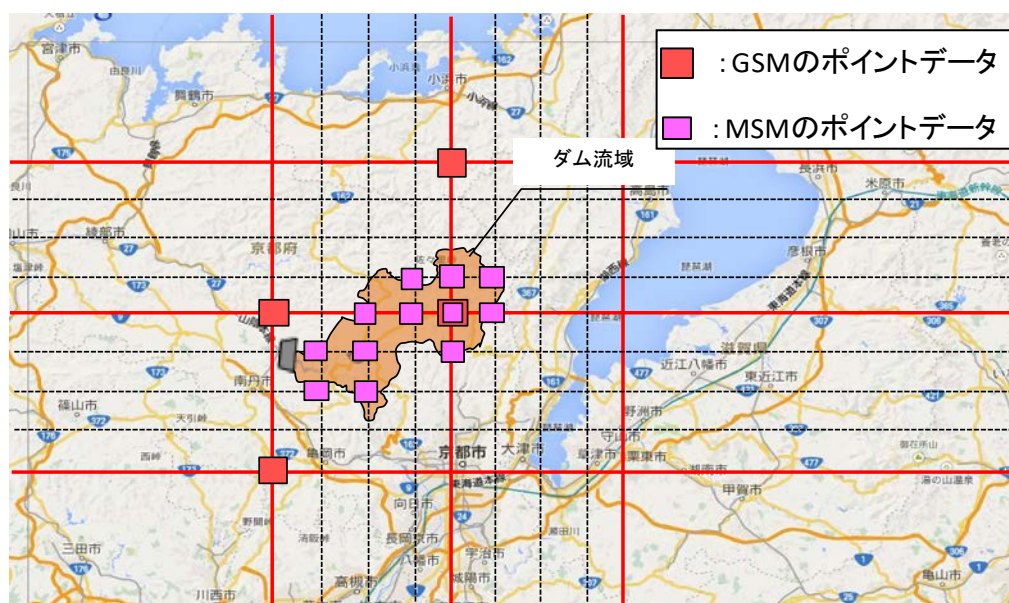


図 3.5(1) ダム流域の例（桂川豪雨，2011）

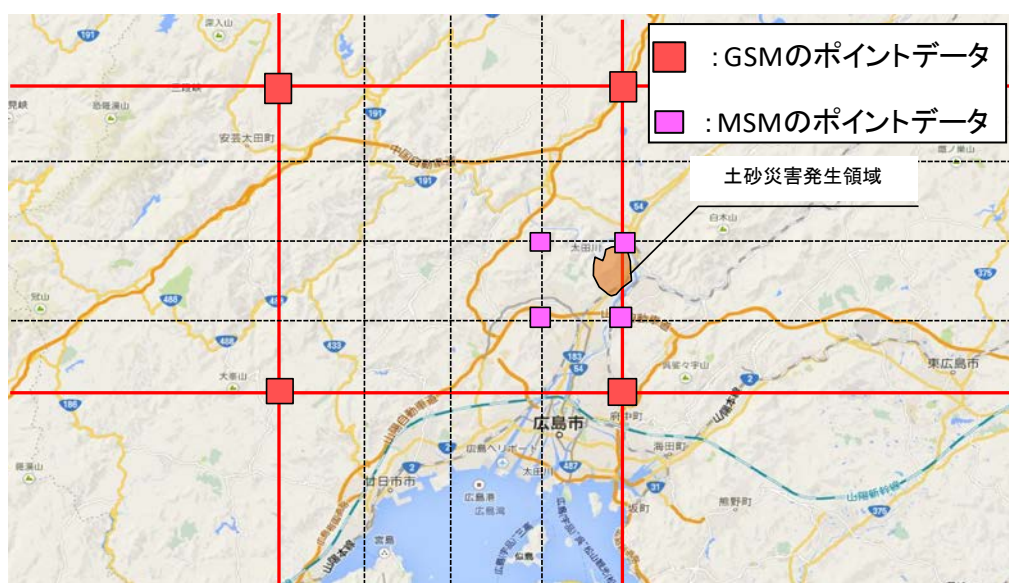


図 3.5(2) 土砂災害発生領域の例（広島豪雨，2014）

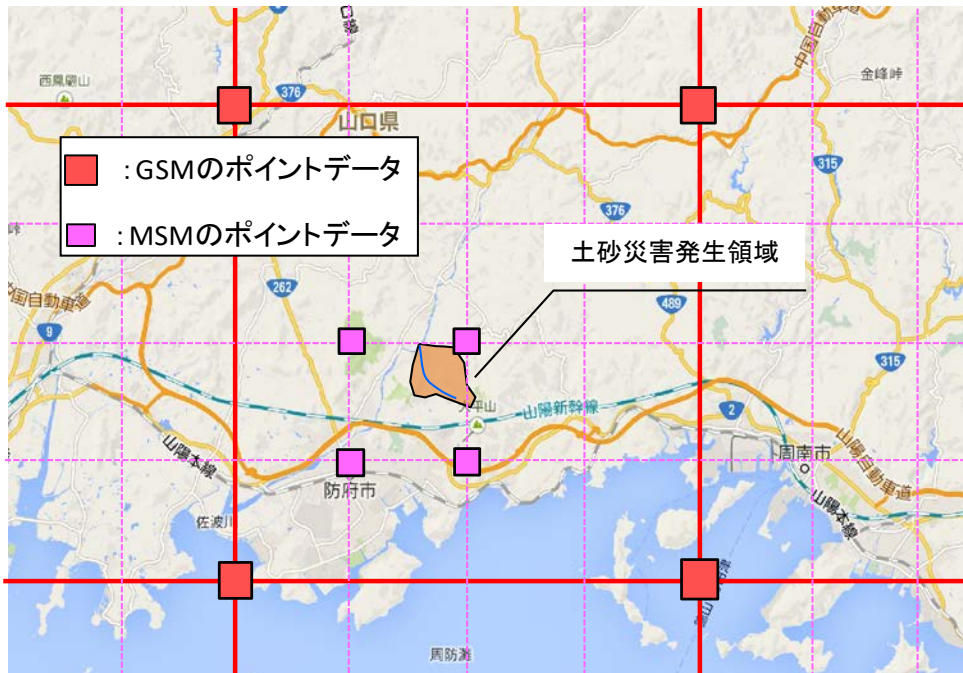


図 3.5(3) 中国・九州北部豪雨

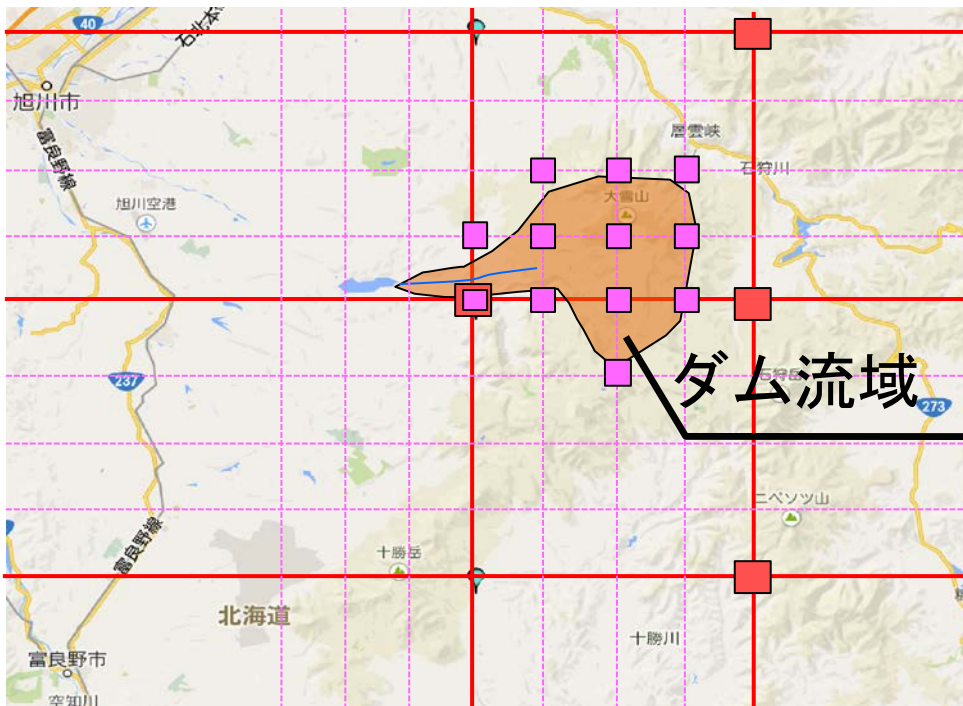


図 3.5(4) 忠別川豪雨

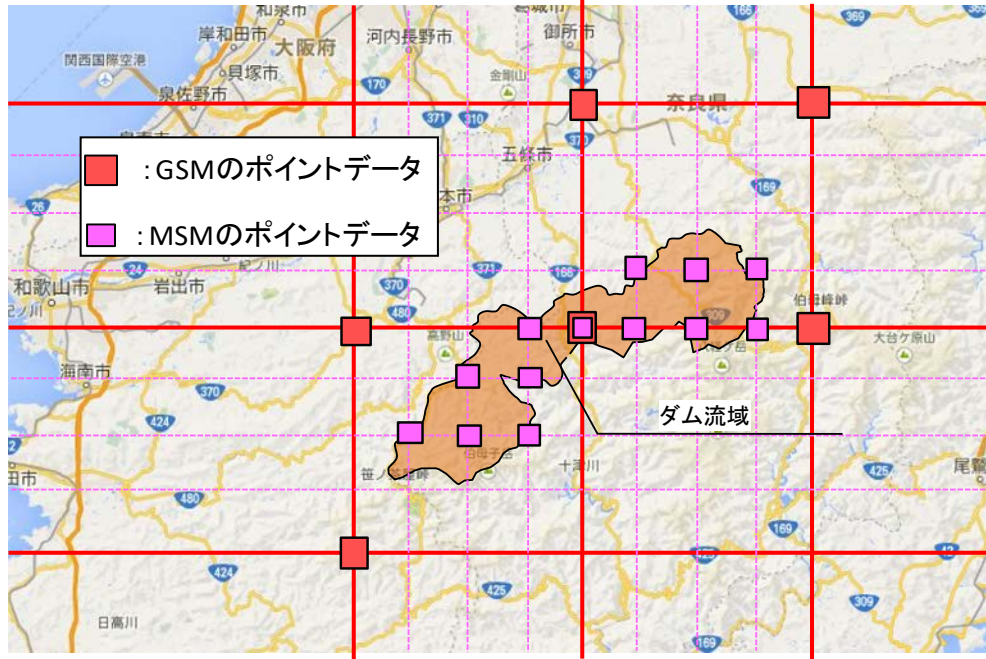


図 3.5(5) 紀伊半島豪雨

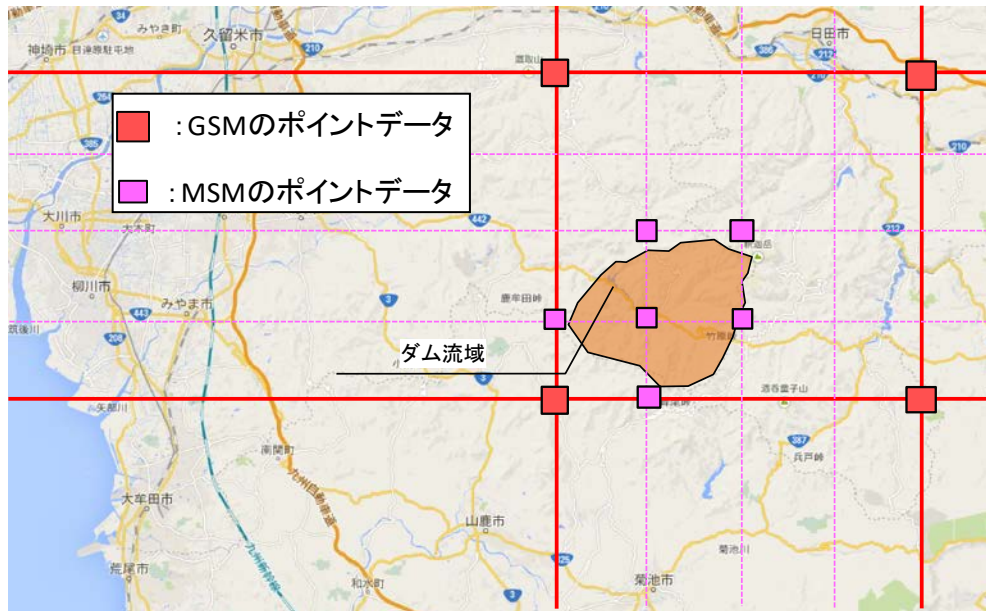


図 3.5(6) 九州北部豪雨

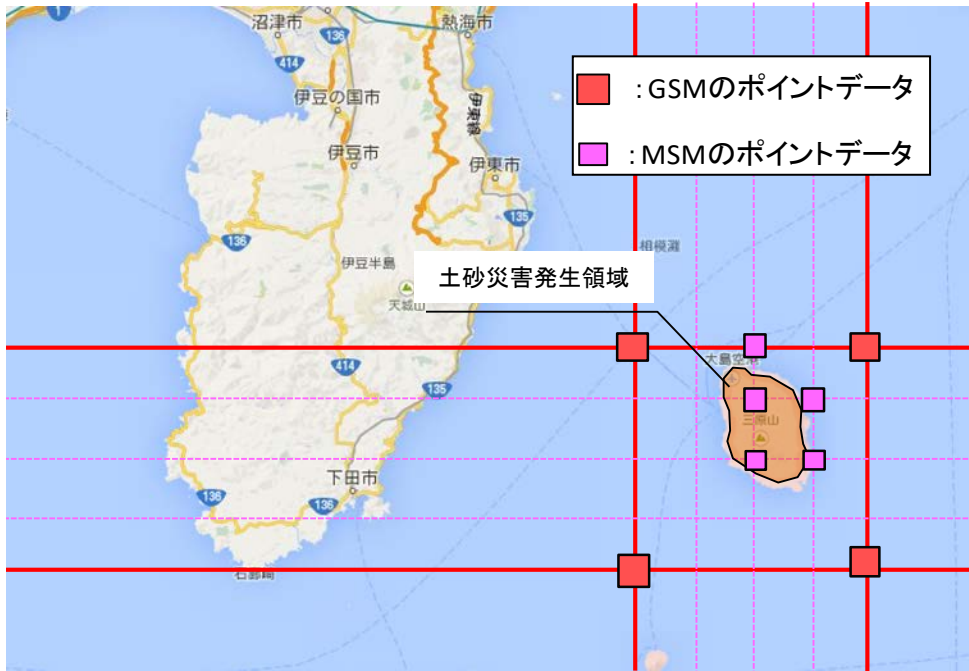


図 3.5(7) 伊豆大島豪雨

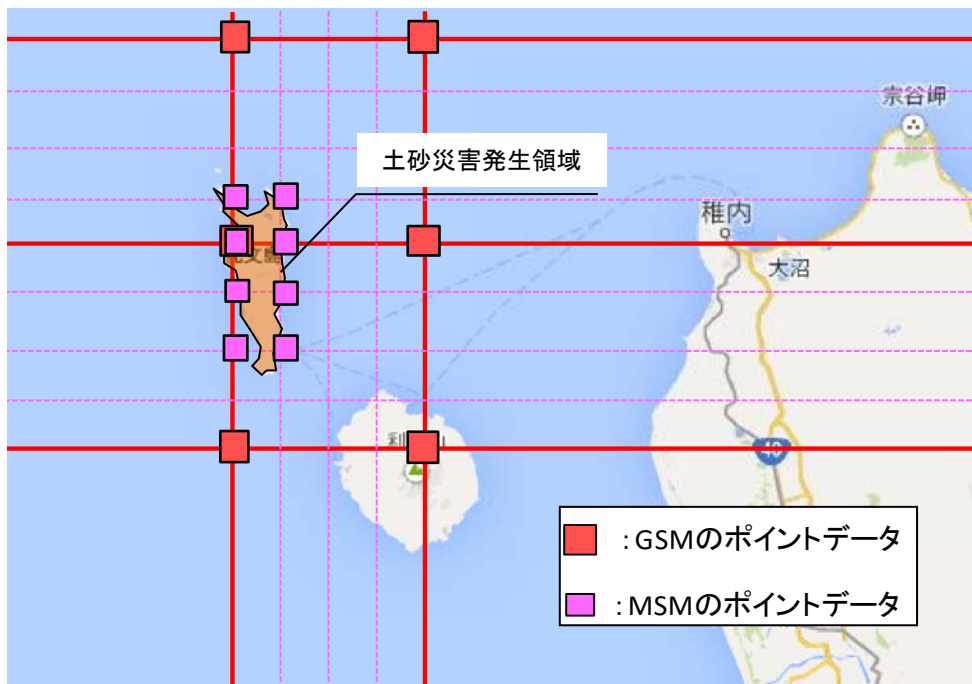


図 3.5(8) 礼文島豪雨

(1) GSM の結果

GSM の相関係数の結果について、時系列値の結果を図 3.6 に、積算値の結果を図 3.7 に示す。その結果、時系列の相関係数（図 3.6）は降雨によりバラツキがある。一方、積算値の相関係数（図 3.7）は、忠別川、紀伊半島、伊豆大島、礼文島豪雨で概ね 0.8 以上である。これらは、台風や低気圧型の降雨要因で相関係数が高い傾向を示した。一方、中国・九州北部、忠別川、九州北部、広島豪雨は相関係数が低い。

台風の予測精度が高かった理由は、進路予測がしやすいことや、GSM の空間解像度（20km）で、再現できる現象であるためと考える。一方で、線状降水帯型と言われる局地的な集中豪雨に対しては、現象が台風に比べ小規模になるため GSM の空間解像度では予測が難しくなったと推察する。

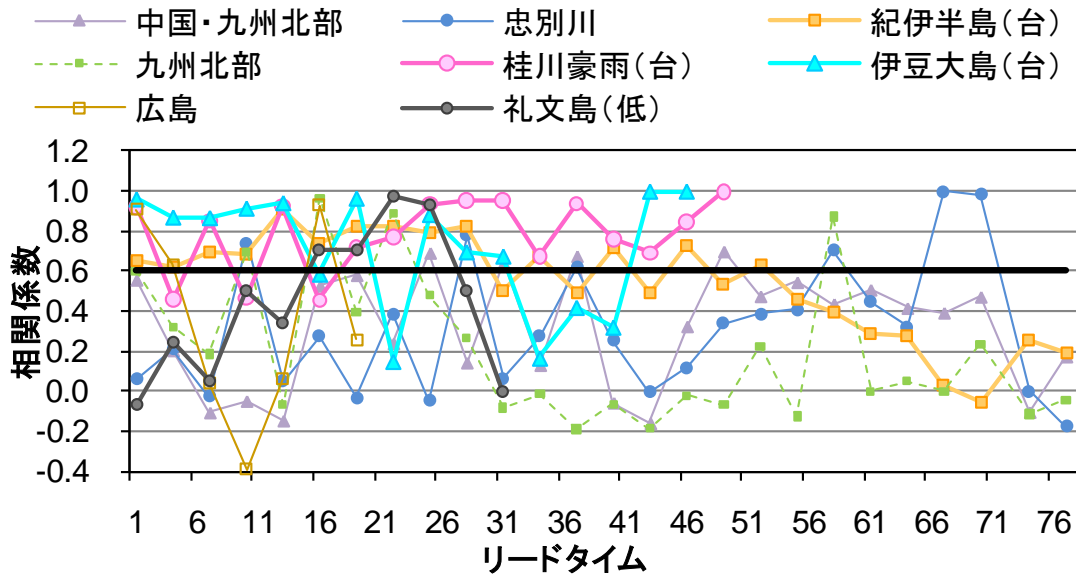


図 3.6 GSM の相関係数 (時系列値)

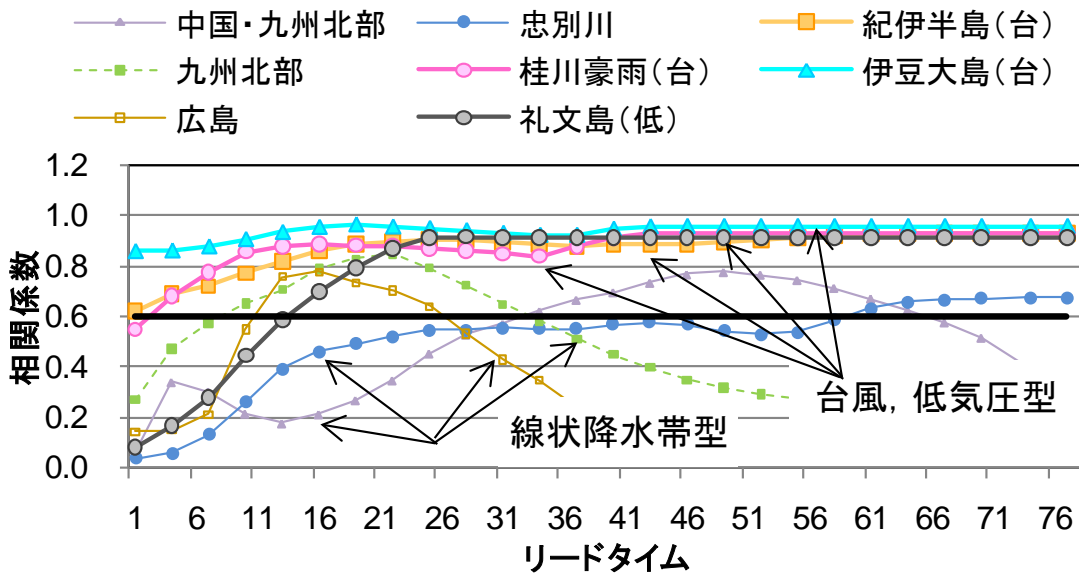


図 3.7 GSM の相関係数 (積算値)

(2)MSM の結果

MSM の相関係数の結果について、時系列値の結果を図 3.8 に、積算値の結果を図 3.9 に示す。時系列値の相関係数（図 3.8）は、降雨によりバラツキがある。一方、積算値の相関係数（図 3.9）は、全ての降雨で 0.6 以上の相関係数が得られ良好である。特に、線状降水帯型の中国・九州北部豪雨、忠別川豪雨、九州北部、広島豪雨の精度が GSM より向上している。これは、GSM が約 20km メッシュで計算されているのに対して、MSM が約 5km メッシュで計算され空間解像度が高いことが主な要因と考える。

また、積算値の相関係数で、LT1～LT6 程度までの相関係数が低い。これは、1 つ目に積算値が 6 時間以上で誤差が相殺されることや、2 つ目に数値気象予報モデル自体の特性として、予測の初期時刻に誤差を持つ報告¹³⁾があり、これらが要因として考えられる。

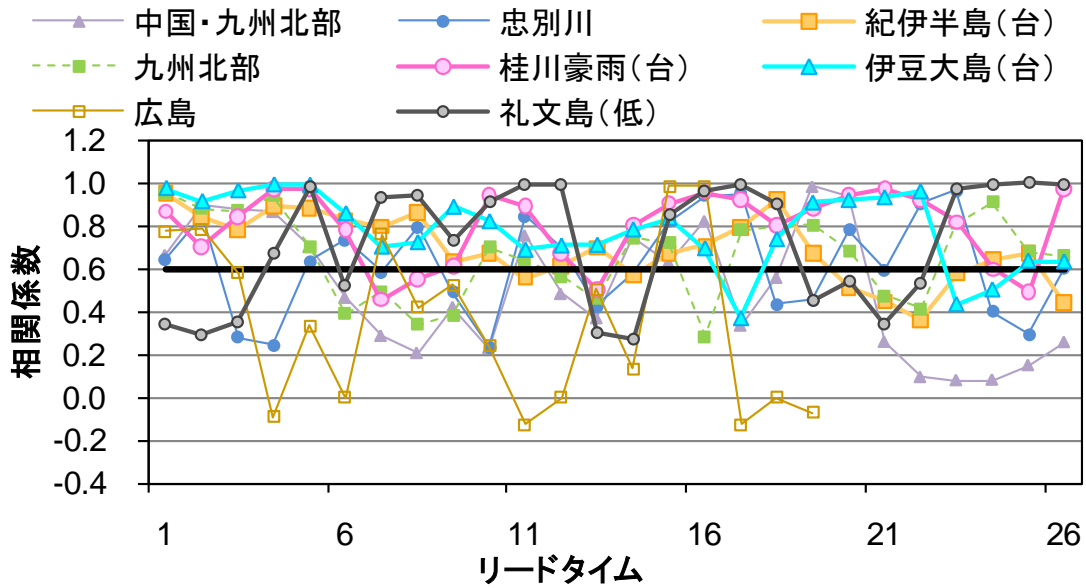


図 3.8 MSM の相関係数 (時系列値)

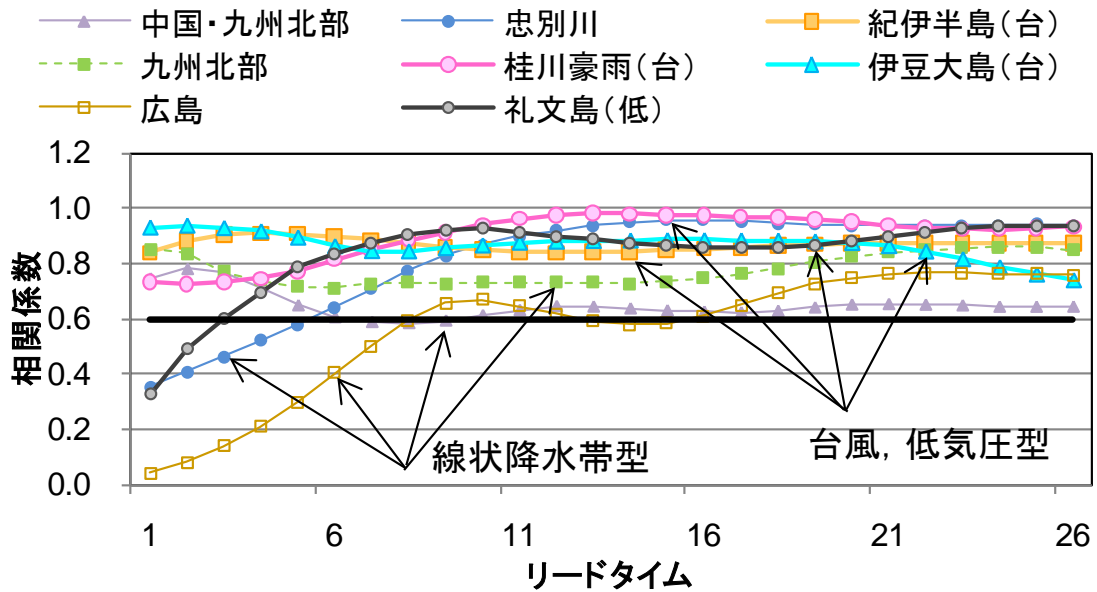


図 3.9 MSM の相関係数 (積算値)

3.4 積算雨量の時系列での評価

災害発生までに数値予報降雨が実用できたかを検証するため、**図 3.10(1)**、**(2)**に積算予測雨量の時系列グラフを整理した。**図 3.10(1)**、**(2)**は、MSMによる積算予測雨量が積算実績雨量に対してどの程度の予測降雨であったかを示している。また、実際に発令した防災情報（大雨警報、土砂災害警戒情報、避難勧告、避難指示）より以前でどの程度予測ができていたかを把握するため、発令のタイミングを図示した。

ここでの積算予測雨量は、災害発生の24時間前、12時間前の予測2ケースを示している。また防災情報は、気象庁の災害時気象速報¹⁴⁾、¹⁵⁾、¹⁶⁾、¹⁷⁾を参考にし、把握できた範囲で入れた。

図 3.10(1)から把握できることは、例えば紀伊半島豪雨や桂川豪雨では、災害発生の24h前に概ね実績の積算雨量を予測できており、災害情報より前に定量的な予測が概ねできていることがわかる。同様に**図 3.10(2)**より、忠別川豪雨、伊豆大島豪雨、礼文島豪雨の予測についても過小傾向だが積算実績雨量の増加勾配に近い予測結果となっている。

しかし、中国・九州北部豪雨、広島豪雨は予測が難しかったことがわかる。これらの降雨予測の活用に向けては予測誤差の範囲を推定し、安全を考慮して何倍すればよいかを検討する必要がある。

- 時間雨量(実績)
 - 大雨警報
 - 避難指示
- 積算雨量(実績)
 - 土砂災害警戒
 - 災害12h前予測
- × 災害発生
 - ▲ 避難勧告
 - 災害24h前予測

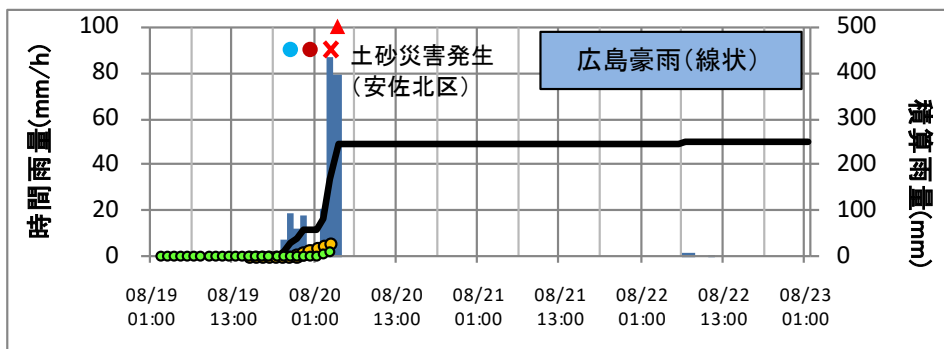
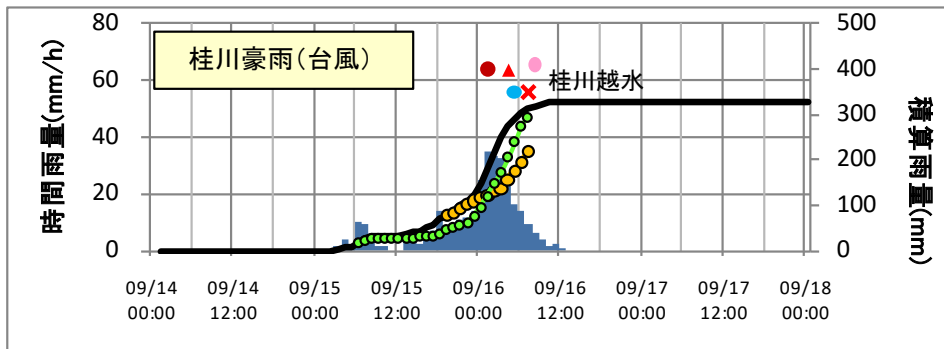
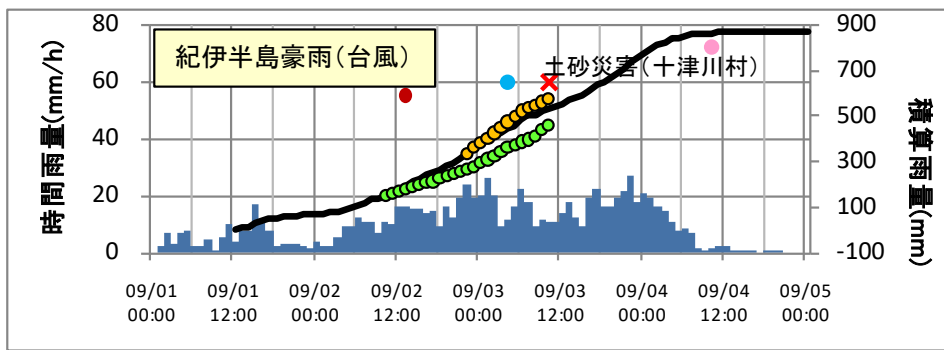
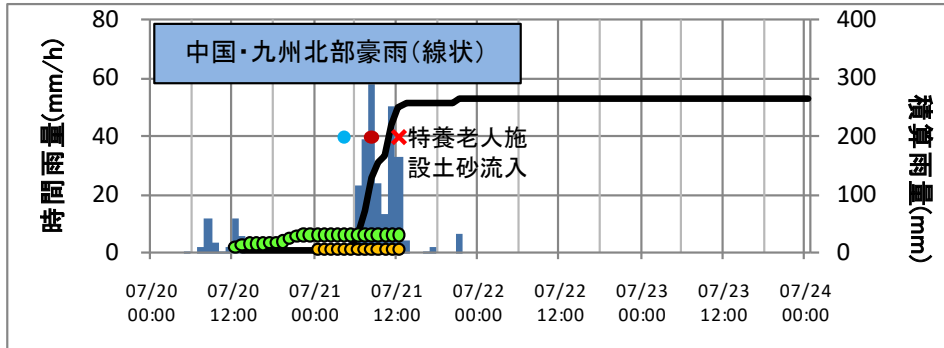


図 3.10(1) 積算予測雨量と避難情報の関係

- 時間雨量(実績)
 - 大雨警報
 - 避難指示
- 積算雨量(実績)
 - 土砂災害警戒
 - 災害12h前予測
- × 災害発生
 - ▲ 避難勧告
 - 災害24h前予測

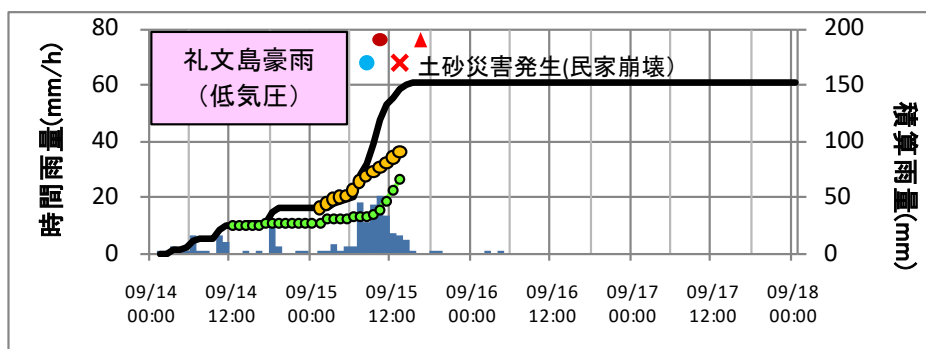
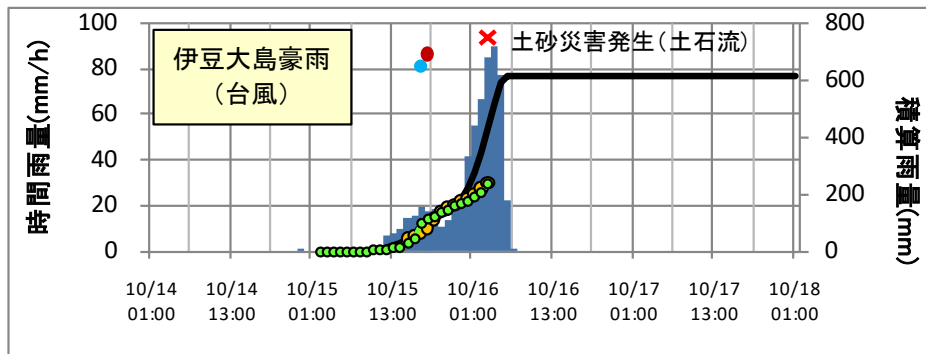
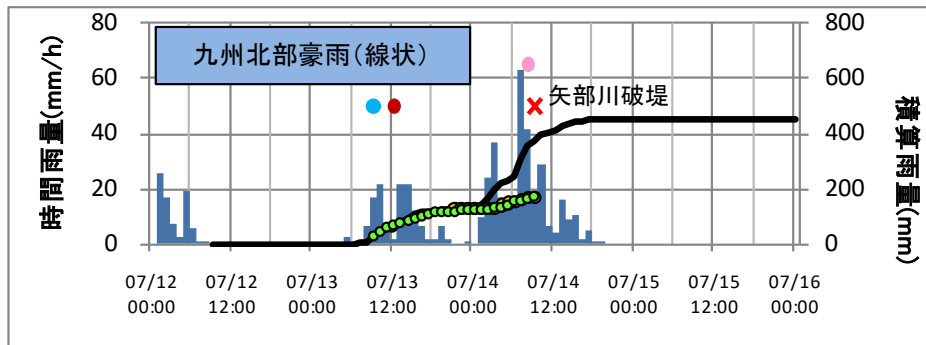
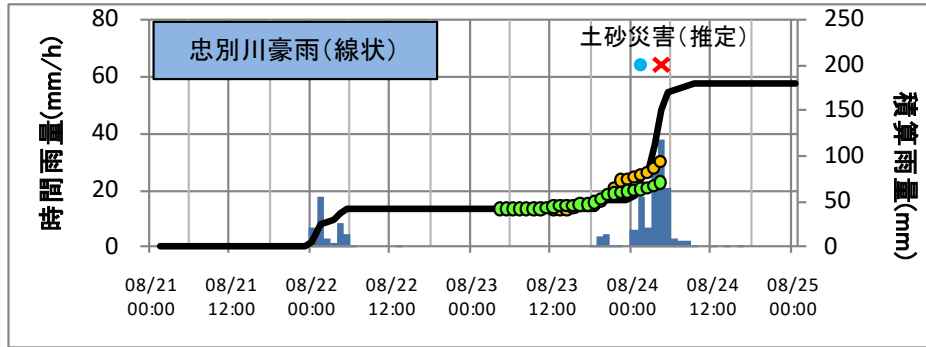


図 3.10(2) 積算予測雨量と避難情報の関係

3.5 積算予測雨量の誤差範囲の推定

(1) 予測・実績雨量の分布図

積算予測雨量の誤算範囲を推定するため、ここでは2つのLT（リードタイム）を例にして実績雨量と予測雨量の分布図を図 3.11(1)、図 3.11(2)に示し、2つのLTの特徴や適用性を調べた。ここで、LT24、LT12のそれぞれの意味合いは、LT24はダム事前放流等への適用を想定したLTであり、ダム水位の低下時間や関係機関との調整に要する時間と考えた。LT12は洪水予測や土砂災害情報などの防災情報への適用を想定したLTである。補足すると、LT12は例えば広島豪雨のような深夜3時の豪雨の場合、前日15時の予測で避難情報として適用可能なLTである。

図 3.11(1)のLT24の分布図は、概ね実績雨量が150～400mmの範囲の雨量になる（伊豆大島は除く）。全体的に予測値が過小傾向である。特に、GSMの中国・九州北部、忠別川、九州北部、広島豪雨で過小予測の傾向が顕著である。一方、MSMは、 $y=x$ のライン上にプロットが現れ精度が改善方向にある。

図 3.11(2)のLT12の分布図は概ね100～250mmの範囲の雨量になる（伊豆大島を除く）。全体的に過小である予測傾向はLT24と同様であるが、紀伊半島、桂川、伊豆大島、礼文島豪雨の台風低気圧型では一定の勾配（関係）があり、誤差を補正すれば洪水予測、土砂災害発生リスクの判定に適用できると考える。

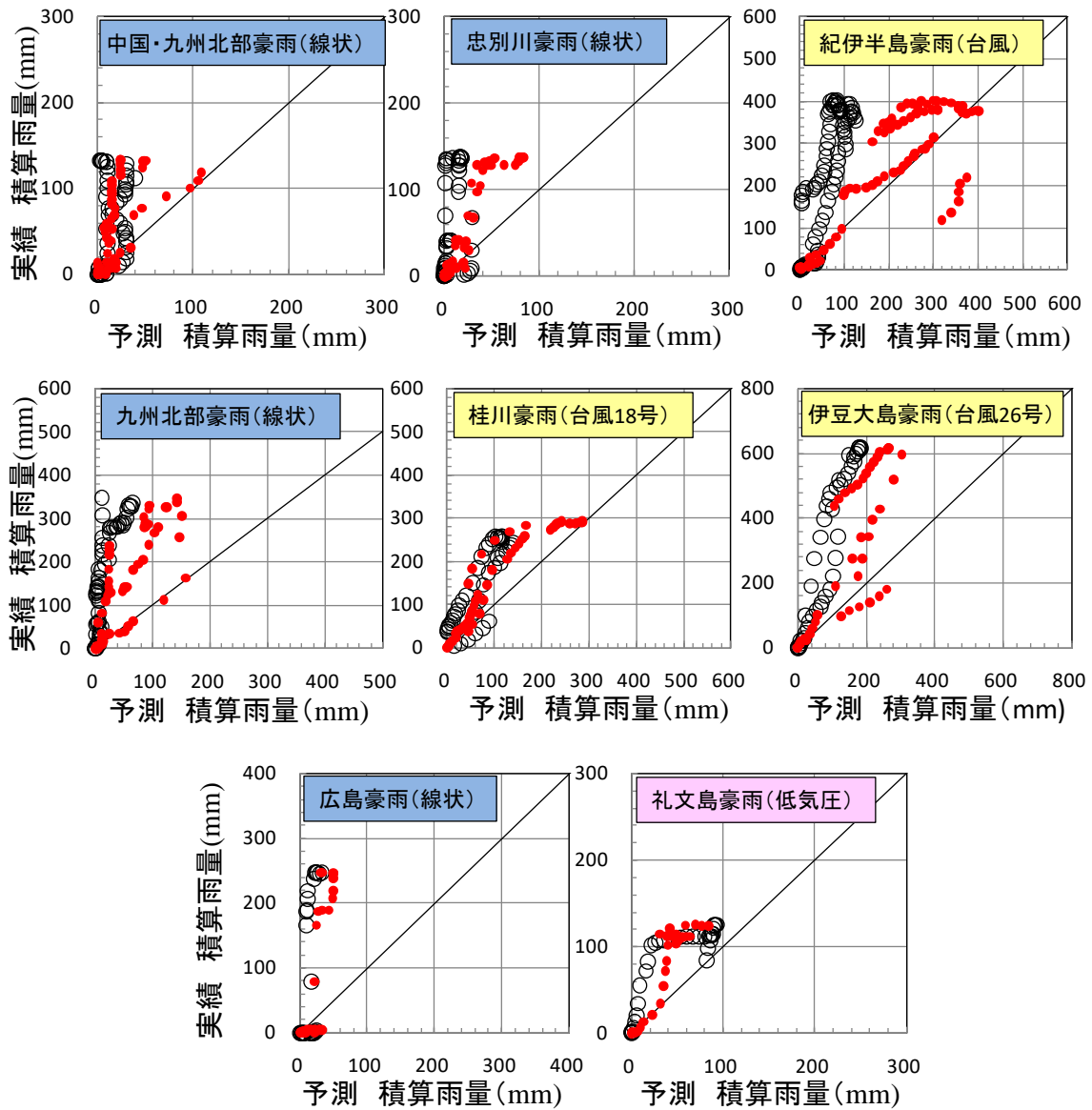


図 3.11(1) 予測雨量と実績雨量の分布 (LT24)

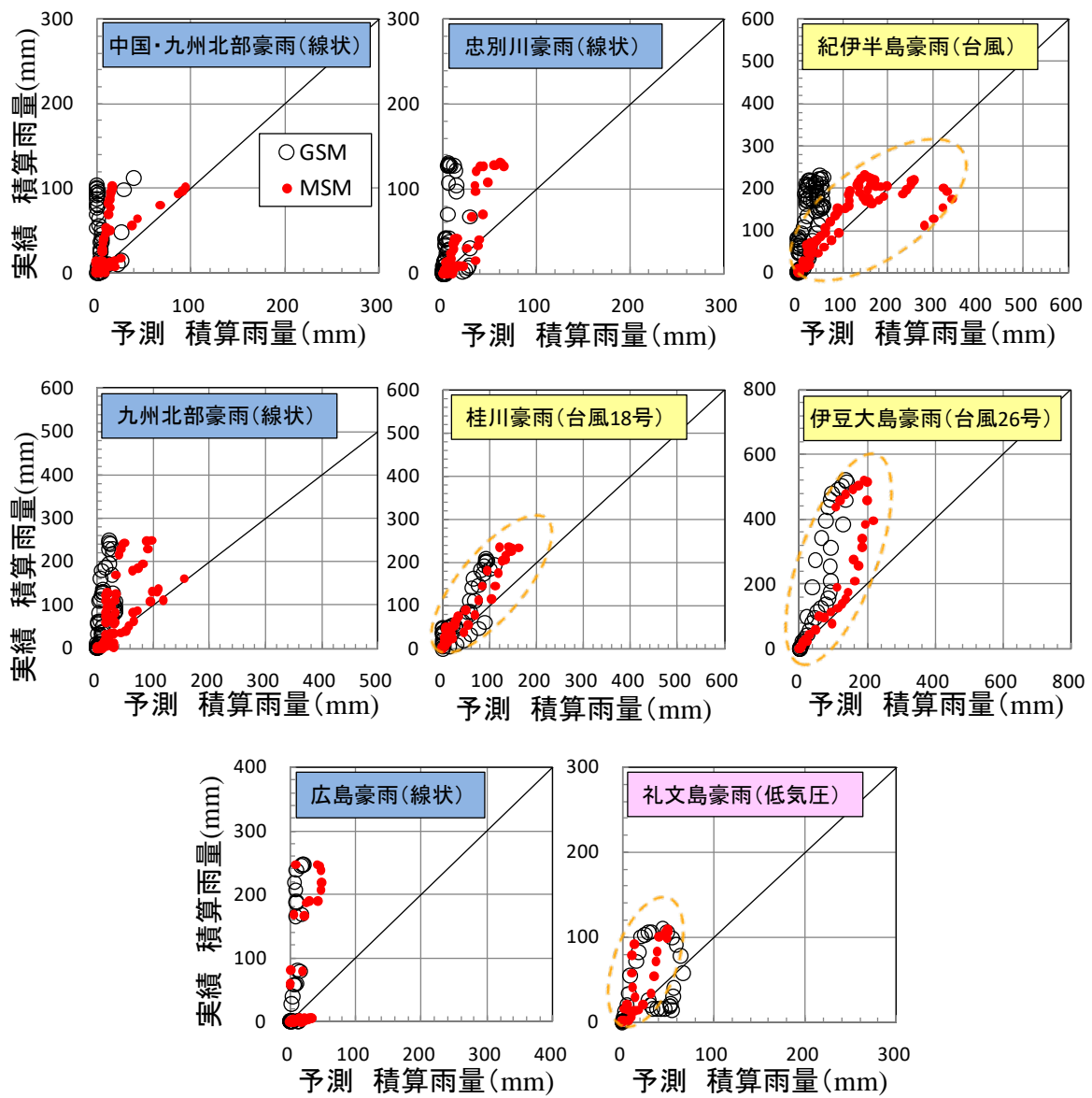


図 3.11(2) 予測雨量と実績雨量の分布 (LT12)

(2) 積算予測雨量の誤差範囲の推定

積算予測雨量の誤差範囲の推定方法^{18),19)}は、GSM, MSMのそれぞれについて以下の流れで行った。以下の説明番号と図3.12内の番号は対応している。

- ① 全ての降雨について、積算予測雨量を0～10mm, 10～20mmのような階級別のヒストグラムを作成する。
- ② 予測雨量に対応する実績雨量に対して、ガンマ分布を当てはめて最頻値を求める。
- ③ 実績雨量の70%出現範囲を算出する。これは台風の中心が予報円に入る確率が70%であることを参考とした。
- ④ 70%の出現範囲について、回帰式からGSM, MSMの誤差範囲を推定する。ここで、積算実績雨量に当てはめたガンマ分布曲線は、以下の式で表される。

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} \exp^{-\beta x} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{\mu^2}{\sigma^2}, \quad \beta = \frac{\mu}{\sigma^2} \quad (2)$$

ここで、 $f(x)$ ：ガンマ分布の確率密度関数、 $\Gamma(\alpha)$ ：ガンマ関数、 α ：形状母数、 β ：尺度母数、 μ ：平均値、 σ^2 ：分散を示す。

実績積算降雨の最頻値は次式で算出する。

$$x = \frac{\alpha - 1}{\beta} \quad (3)$$

さらに、積算実績雨量の70%の範囲については、(1)式の確率密度関数 $f(x)$ を積分し、上下限の15%を除けばよいので以下の(4)式で算出できる。

$$\text{下限値} : \int_0^{r_{\min}} f(x) = 0.15, \quad \text{上限値} : \int_0^{r_{\max}} f(x) = 0.85 \quad (4)$$

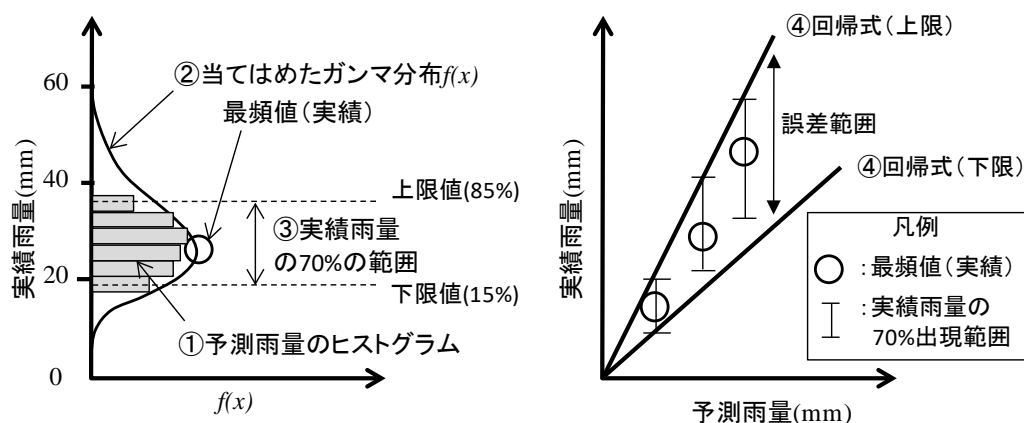


図 3.12 予測雨量の誤差範囲の推定方法

予測雨量の分布 と ヒストグラム の例を 図 3.13 に示した。 図 3.13 は、 上段が GSM の LT24 で、 下段が MSM の LT24 を示す。 図 3.13 の左図は予測・実績雨量の分布図を示し、 右の3つ並ぶグラフは、 棒グラフ：積算予測雨量のヒストグラム、 黒曲線が積算実績雨量のガンマ曲線、 ○が積算実績雨量の最頻値、 赤点線が積算実績雨量の70%出現範囲を示している。

図 3.13 より、 2つのことがわかる。 1点目は、 GSM、 MSM とともに、 雨量の階級が大きくなると（ヒストグラムの3つのグラフを右へ見ていく）と、 実績雨量の70%出現範囲が広がるので、 雨量が増えると精度が低下する点である。 2点目は、 MSM の70%出現範囲はGSMに比べ狭くなり精度が向上している点である。

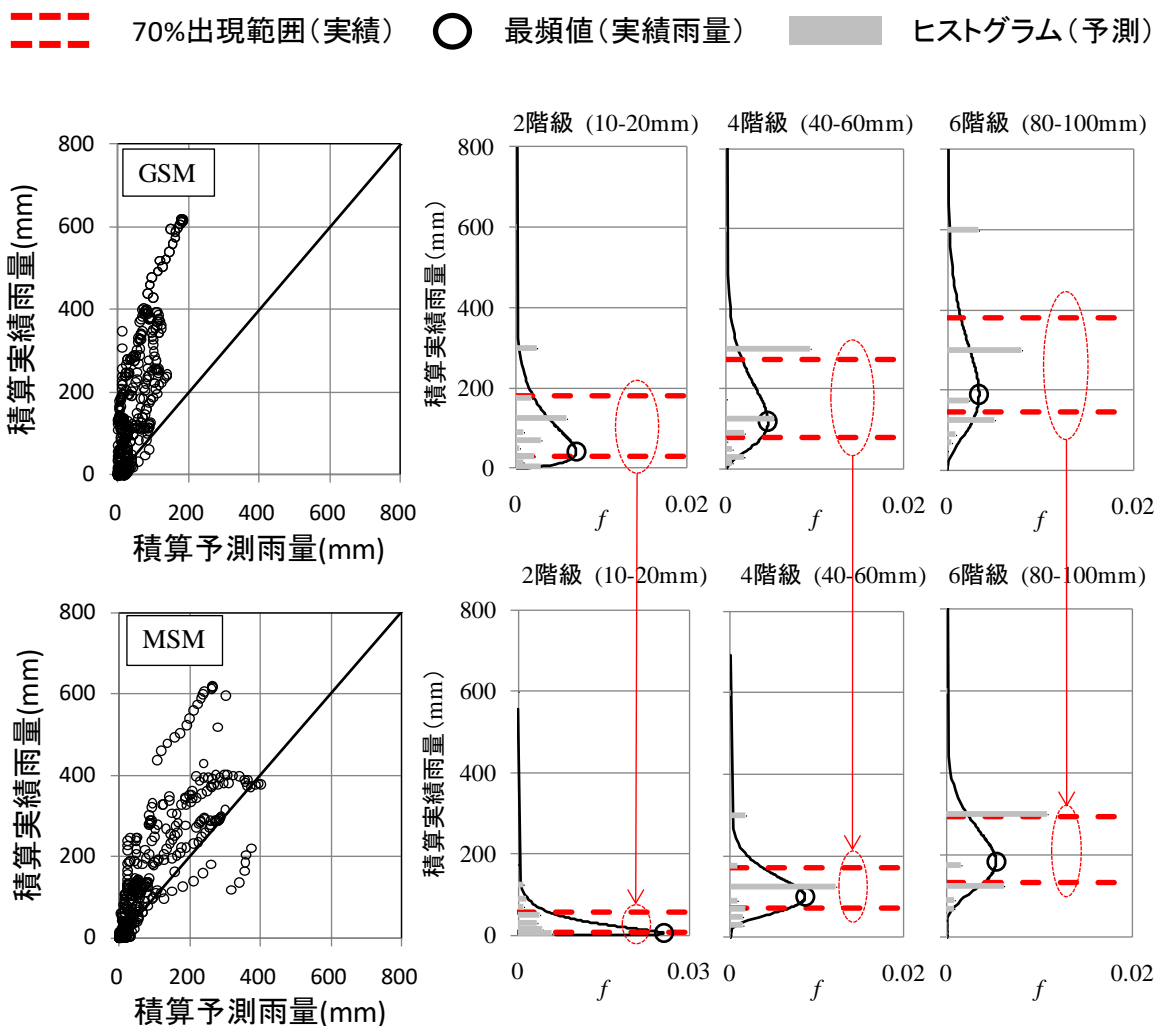


図 3.13 予測雨量の分布 及び ヒストグラムの例

次に、積算予測雨量に対する実績雨量の70%出現範囲の回帰式を図 3.14、図 3.15 に示した。図 3.14、図 3.15 では、全てのデータを扱い分析した場合を黒い凡例、台風低気圧型のデータ（紀伊半島、桂川、伊豆大島、礼文島豪雨）で分析した場合を赤い凡例で示している。

その結果、全てのデータで見た場合、LT24 の GSM（図 3.14 左）は回帰係数の幅が 2.0～4.5 倍と幅があるのに対して、LT24 の MSM（図 3.14 右）では 1.1～2.9 倍で狭くなり予測精度が向上している。また、LT12（図 3.15 左右）の場合も LT24 の結果と同様に MSM で予測精度が向上した。特に、MSM の LT12 は、台風・低気圧型で見れば 0.9～1.9 倍と最も狭く精度が高いことがわかった。以上より、降雨パターンによる予測誤差の範囲を推定できた。

I 実績雨量の70%出現範囲 (すべての降雨を対象) ■ 実績雨量の70%出現範囲 (台風、低気圧タイプのみ) ○ 最頻値(実績)

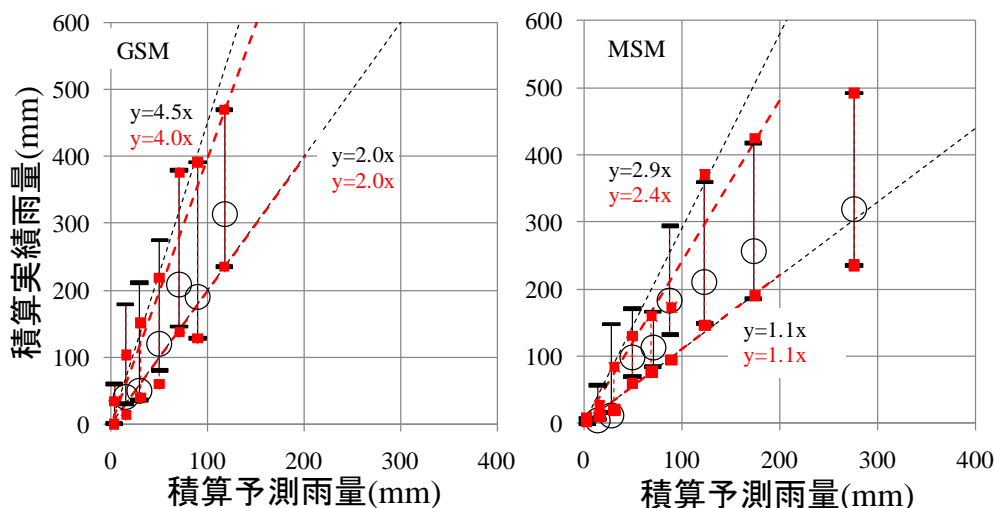


図 3.14 LT24 の積算予測雨量に対する積算実績雨量の出現範囲

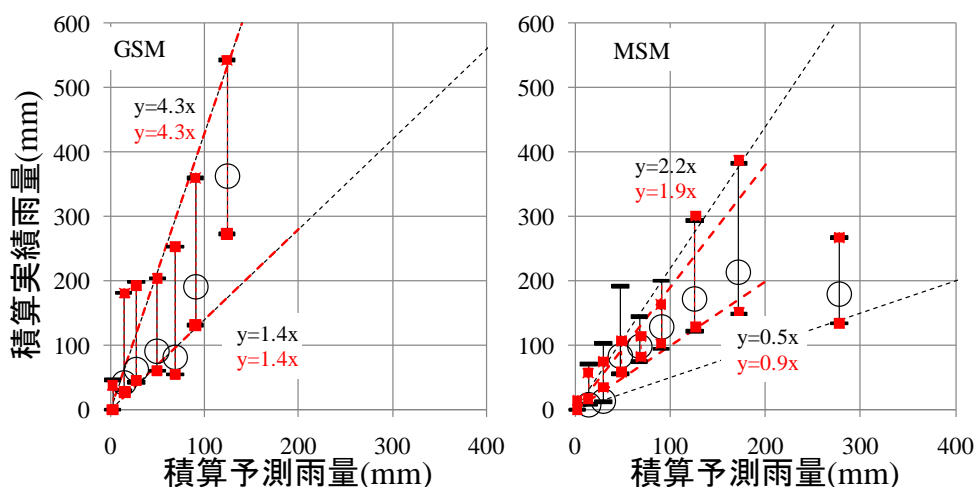


図 3.15 LT12 の積算予測雨量に対する積算実績雨量の出現範囲

他の研究事例として臼谷ら¹⁸⁾は、予測雨量の範囲は実績雨量の0.7~1.8倍という報告をしている。本研究の分析結果は、0.9~1.9倍（MSM、台風ケース）であり、臼谷らの分析結果と近い結果であることを確認した。また、本研究の予測雨量の誤差範囲の推定は、日本全国で発生した降雨を対象としていることも踏まえると、推定結果には一般性があるものと考えられる。

次に以上を踏まえ、回帰係数について整理した。回帰係数を幅 α_w が $\alpha_w=1.0\sim 1.5$ の範囲は◎、 $\alpha_w=1.5\sim 2.0$ の範囲は○、 $\alpha_w=2.0\sim 3.0$ の範囲は△と定義し、降雨予測の適用性を表 3.5 にまとめた。表 3.5 より MSM については予測精度が高く、防災情報や施設運用などへの幅広い適用性を確認した。一方、GSM は今回の極端豪雨については精度が低い傾向にあり、台風・低気圧型の要因に限定した活用とし、防災情報の適用については慎重な取り扱いが必要である結果となった。

表 3.5 回帰係数の幅と適用性

	GSM 全てのデータ	GSM 台風・低気圧 のデータ	MSM 全てのデータ	MSM 台風・低気圧 のデータ
ケース:LT24 (施設運用の 適用を想定)	△ $\alpha_w = 2.5$	○ $\alpha_w = 2.0$	○ $\alpha_w = 1.8$	◎ $\alpha_w = 1.3$
ケース:LT12 (防災情報の 適用を想定)	△ $\alpha_w = 2.9$	△ $\alpha_w = 2.9$	○ $\alpha_w = 1.7$	◎ $\alpha_w = 1.0$

※ 台風低気圧型の回帰式は、積算雨量200mm以下を対象とした。

3.6 本章のまとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 近年の大災害をもたらした事例を対象に2種類の数値気象予報モデル(GSM, MSM)で計算された予測雨量を比較し, LTの延長に伴う相関係数の検討から, 積算予測雨量の有効性を提示した.
- (2) 積算雨量の時系列での評価から, 積算予測雨量の精度は, 台風など長時間降るような降雨については概ね良好であり, 短時間で局地的に降る降雨についてもMSMが活用できる可能性があることを示した.
- (3) 実績雨量のヒストグラムにガンマ分布を当てはめ, 予測雨量と実績雨量の誤差範囲を示し, 防災対応やダム等操作等に活用するための補正方法を提示した. 具体的には, 防災対応では2.2倍(台風低気圧型の場合は1.9倍), ダム等の施設運用については2.9倍(台風低気圧型の場合は2.4倍)の誤差補正をすることで適用できる可能性を示した.

3.7 参考文献

- 1) 気象庁：数値予報モデルの種類
<<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-4.html>>（アクセス日 2017/4/11）
- 2) 気象庁：数値予報とは
<<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-1.html>>（アクセス日 2017/4/11）
- 3) 一般財団法人 気象業務支援センター：メソ数値予報モデル GPV (MSM)
<<http://www.jmbasc.or.jp/jp/online/file/f-online10200.html>>（アクセス日 2017/4/11）
- 4) 清水康行：2010年北海道豪雨災害調査報告，河川災害に関するシンポジウム，pp. 9-23，2011.
- 5) 角哲也，竹林洋史：2011年台風12号に伴う紀伊半島の災害概要と総合土砂管理への課題，河川災害に関するシンポジウム，pp. 15-24，2012.
- 6) 土木学会九州北部豪雨災害調査団，平成24年7月九州北部豪雨災害調査団報告書，pp. 1-45，2013.
- 7) 竹林洋史：2013年9月京都・滋賀水害調査報告，河川災害に関するシンポジウム，PP. 19-24. 2014.
- 8) 清水義彦：台風26号(平成25年10月16日)による伊豆大島豪雨災害調査報告，河川災害に関するシンポジウム，PP. 25-30. 2014.
- 9) 気象庁：災害時気象速報 平成21年7月中国・九州北部豪雨，pp. 1-44，2009.
- 10) 国土交通省：水文水質データベース
<<http://www1.river.go.jp/>>（アクセス日 2017/4/11）
- 11) 気象庁：過去の気象データ検索
<<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>>（アクセス日 2017/4/11）
- 12) 地球流体電脳倶楽部 HP<<http://dennou-h.gfd-dennou.org/>>
- 13) 気象庁 予報部：数値予報の基礎知識－数値予報の実際－，pp. 41-42，2005.
- 14) 旭川地方气象台：平成22年8月13日から14日の大雨に関する気象速報，pp. 1-9，2010.
- 15) 気象庁：平成23年台風12号による8月30日から9月5日にかけての大雨と暴風，pp. 1-79，2011.
- 16) 福岡管区气象台：災害時気象速報 平成24年7月九州北部豪雨，pp. 1-36，2012.

- 17) 広島地方気象台：成 26 年 8 月 19 日から 20 日にかけての広島県の大雨について， pp. 1-10, 2014
- 18) 林下直樹，中津川誠：降雨予測リードタイムの延長による多目的ダムの弾力的管理の向上，土木学会論文集 B, Vol. 70, No. 4, I_1471-I_1476, 2014.
- 19) 臼谷友秀，中津川誠：積算予測雨量に基づいた融雪期におけるダムの洪水調節機能の向上について，土木学会論文集 B, Vol. 66, No. 3, 268-279, 2010.

第4章 低平地河川を対象とした内水・外水を

一体化した氾濫解析

4.1 氾濫解析手法に関する現状と課題

(1) 氾濫予測モデルの現状

近年、日本各地で極端な豪雨が発生し、堤防決壊や越水による氾濫被害が発生している。平成27年9月には、台風17号により湿った空気が流れ込み、南北に線状降水帯が発達して、9月10～11日に日光市で24時間に500mm以上の降雨を記録した。この豪雨により、利根川の支川の鬼怒川で破堤し、2名が亡くなり、関東・東北で19,000戸以上の家屋が浸水した¹⁾。

また、平成28年8月の中旬から下旬にかけて、北海道を中心に約2週間で4つの台風が上陸・接近する異例の事態が生じた。これによって、堤防の決壊と氾濫や道路・橋梁の陥没・流出被害が発生し、尊い人命が失われたうえ多くの住家や農地が被害を受けた。土木学会北海道豪雨災害調査団²⁾の速報では、帯広や富良野で3日間で500mmを越える雨量を記録し、石狩川、十勝川、常呂川等の一級水系で計画高水位を越えたことが示された。

これらの豪雨により、局地豪雨や計画を上回る大雨に対し、氾濫被害を軽減するような、洪水・浸水予測による避難情報の提供やダムや排水機場等などの河川管理施設の操作・運用の備えが必要であると考えられる。

上記のような問題に対する先行研究として、佐伯・鈴木ら³⁾は、石狩川の大規模出水の浸水予測について、河床変動計算や氾濫解析等を行うインターフェイスであるiRICで解析を行い、内水氾濫や計画規模以上の氾濫を地域毎に把握しておく必要性を指摘した。国総研では、下水道管やポンプを考慮した浸水予測モデル⁴⁾(NILIM)を開発し、都市の内水被害を軽減することに役立てた。近年では、関根・浅井ら⁵⁾が神田川流域を対象に、地上・下水道・河川を一体的に取り扱う精緻な浸水予測を示した。また佐山・建部ら⁶⁾は、降雨-氾濫一体モデル(RRLモデル)を開発し、チャオプラヤ川流域を対象に予測降雨情報を活用した氾濫予測手法を示した。秋山・重枝ら⁷⁾は、本支川破堤、排水機場、遊水地を合わせた内外水複合氾濫解析の開発に取り組み、バランスの取れた治水システムの構築に資する研究開発に取り組んでいる。

(2) 氾濫予測モデルの課題

近年報告された洪水・浸水解析モデルの特徴を表 4.1 に整理した。それぞれ流域の特性を勘案して作成されたもので一概に比較することはできないが、遊水地や排水機場などの洪水調節施設が追加されるにつれて、複雑な条件設定が必要になるため、河道や氾濫原を一体で解析するようなモデルの構築が難しくなる。

本研究モデルは、ダム、遊水地、樋門、排水機場などの治水施設の操作・運用を考慮した総合的な氾濫解析モデルであり、さらに第 5 章で示すが 6 箇所³⁾の遊水地群を考慮した点において、全国的に例が無く特徴的であると考えられる。

表 4.1 治水施設を考慮した氾濫解析モデル^{3), 5), 6), 7), 8), 9)}

河川	研究者	河道モデル	氾濫解析モデル			
			氾濫モデル	遊水地	排水機場	樋門
神田川 (2015)	関根ら	1次元	街路ネットワーク	-	考慮	-
チャオプラヤ川 (2013)	佐山ら	2次元	降雨流出一体	-	-	-
六角川 (2016)	秋山ら	2次元	2次元	容量 $V = 90 \text{ 万 m}^3$	考慮	-
渡良瀬川 (2011)	福岡ら	2次元	-	容量 $V \approx 17,000 \text{ 万 m}^3$	-	-
千歳川	本研究 沖・中津川	1次元	2次元	容量 $V = 4,500 \text{ 万 m}^3$ 6箇所	考慮	考慮

※) 1次元は一次元不定流計算、2次元は二次元不定流計算を示す。

4.2 対象流域

(1) 流域の特徴

千歳川流域は、上流端に支笏湖を水源とした石狩川の1次支川である。流路延長が108km、流域面積が1,244km²で一級水系に比肩する規模の河川である。千歳川流域は、江別市、千歳市、恵庭市、北広島市長沼町、南幌町の4市2町が存在し、流域人口は36.7万人（平成17年国勢調査）である。主な産業は、水田、畑作、食品製造業などで、新千歳空港の一部分も流域内に含まれる¹⁰⁾。



図 4.1 千歳川流域図

千歳川流域の標高を図 4.2 に示す。千歳川の水利的な特徴としては、石狩川の支川の一つであり、その背水影響を 30km 以上にわたり受ける河川であり、流域の主要部分が地盤の低い低平地を流れるため、氾濫リスクが高い。

千歳川流域は、新千歳空港や苫小牧港から物資輸送の経路である高速道路、国道 36、274 号線がある。特に、石狩地方と道東地方の東西を連結する国道 274 号線は、千歳川の近傍を交通し、ひとたび洪水となれば、サプライチェーンが寸断するリスクがある。

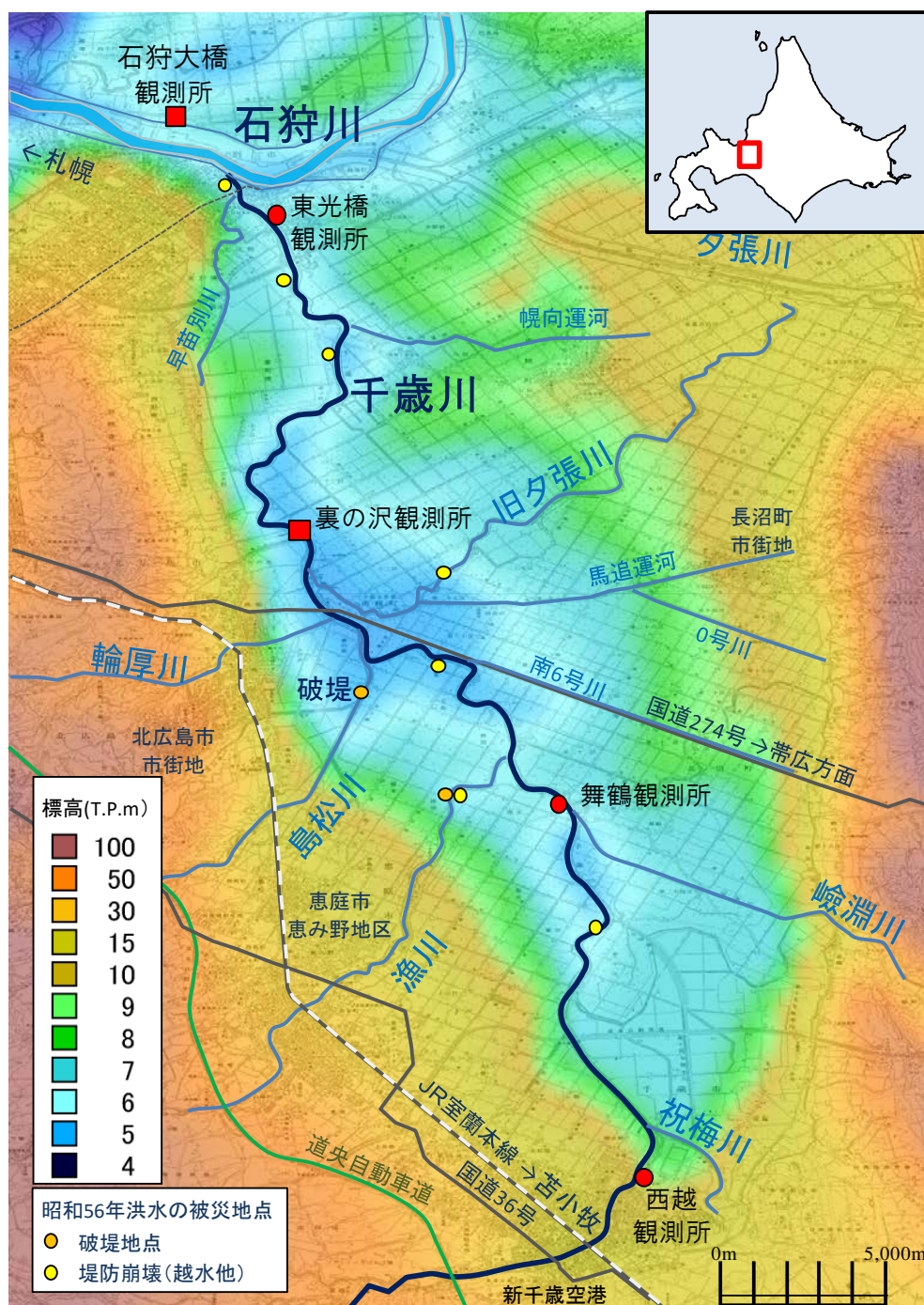


図 4.2 千歳川の標高

(2) 流域の洪水被害

石狩川流域の流域平均年降水量は、約 1,300mm/年であるが千歳川流域は約 1,500mm/年と比較的多雨地域である。昭和 56 年洪水は、8 月 3 日～6 日にかけて、北海道中央に停滞した前線と台風 12 号の影響で、北海道全域が大雨となり、千歳川流域の流域平均雨量は、330mm/3 日を越え、観測史上最高の記録となった。この洪水で、千歳川の水位が計画高水位を越え、浸水面積が 192km²、浸水家屋が約 2,700 戸の洪水被害となった¹⁰⁾。

昭和 56 年洪水当時の空中写真を図 4.2(1)、(2)に示す。写真から、千歳川が石狩川の背水影響に伴い堤防満杯状態であることや、堤防沿に広がる低平地の農地や宅地が浸水している様子が確認できる。

また、近年の主要な洪水としては、平成 13 年洪水があり、平成 13 年 9 月 9 日～13 日にかけて、前線と台風 15 号により、千歳川流域における流域雨量は 180mm/3 日を記録した。平成以降における大規模出水であったが千歳川流域で大規模な浸水被害は生じていない。

本研究では、昭和 56 年洪水と平成 13 年洪水の 2 洪水を対象にして、次節以降に再現解析の結果を示す。



图 4.2(1) 昭和 56 年洪水（江別市東野幌付近）



图 4.2(2) 昭和 56 年洪水（早苗別付近，石狩川合流点付近）

4.3 内水・外水を一体化した氾濫解析モデル

内水・外水を一体化した氾濫計算モデルは、3つの要素モデルで構成した（図4.3）。1つ目が流出解析で、千歳川本川および支川流量について一段タンク型貯留関数法により計算した。2つ目が千歳川の河道追跡計算で、一次元不定流計算により行った。支川の河道追跡計算は、6大支川（旧夕張川、輪厚川、島松川、漁川、嶮淵川、祝梅川）とその他の支川、運河、排水路について考慮し、千歳川の背水影響が伝搬するモデルとした。3つ目が氾濫計算で、平面二次元不定流により行った。氾濫解析モデルは、千歳川本川の越水・破堤を考慮するとともに、支川、運河、排水路の越水・破堤氾濫を考慮することで低平地河川の内水・外水氾濫を一体で考慮している。なお、モデル内においては、遊水地群、樋門、排水機場や、氾濫原にある盛土構造物は高速道路などの主要なものについて考慮した。

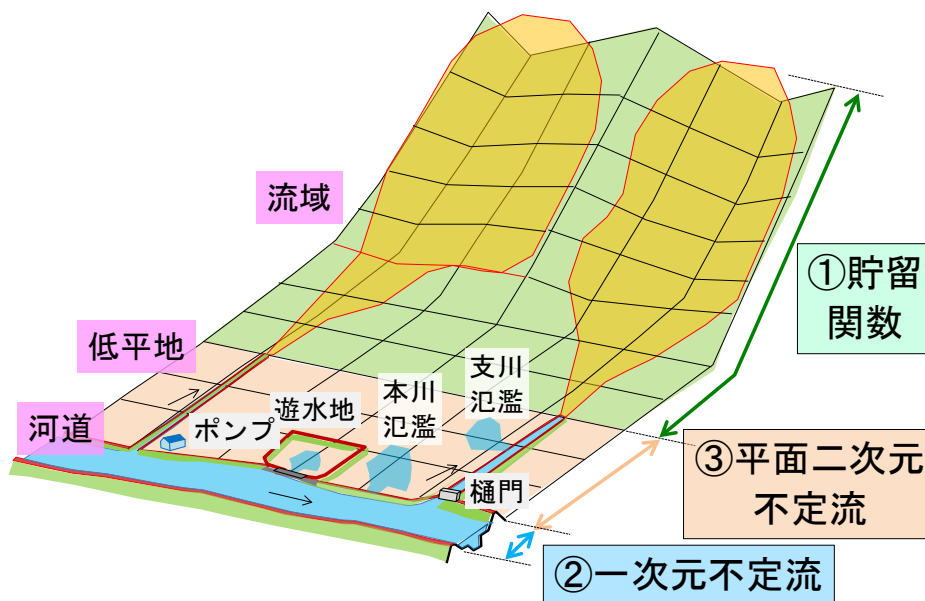


図 4.3 内水・外水を一体化した氾濫解析モデルの模式図

(1) 流出解析

千歳川は、低平地を流れる緩流河川で、千歳川中流の約 3.0km の区間に 3 支川（輪厚・旧夕張・島松川）が合流し高低差が定めづらいエリアがある。そのため、流出解析は集中型流出モデルとし、札幌開発建設部資料を参考に $10^1 \sim 10^2 \text{km}^2$ のオーダーに分割した流域面積と流域平均雨量を一段タンク型貯留関数モデルに入力し、本川、支川等の流出量を算出した。

流出解析モデルは、(1)式に示す損失項を考慮した一段タンク型貯留関数法¹¹⁾を用いた。本手法は、(財)北海道河川防災センター（現（一財）北海道河川財団）の星¹¹⁾により開発されたモデルである。現在は、中津川・臼谷らにより河川の流れ、流砂、河床変動計算などを行うインターフェイス iRIC の中に、SRM（Strage Routing Model）¹²⁾と呼ばれるソルバーとして組み込まれ、フリーソフトとして公開されている。(1)、(2)式で点線で囲んだパラメータ k_{11} 、 k_{12} 、 k_{13} 、 λ は、(3)式に示す星らが石狩水系の 72 洪水を解析し求めた最適パラメータ値¹¹⁾とする。

$$\begin{cases} S = k_{11}q^{p_1} + k_{12} \frac{d}{dt}(q^{p_2}) \\ \frac{dS}{dt} = r - q - b + q_0 \\ q_0 = q_B \exp(-\lambda t) \\ b = k_{13}q \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} k_{11} = c_{11} A^{0.24} \\ k_{12} = c_{12} k_{11}^2 (\bar{r})^{-0.2648} \\ k_{13} = c_{13} - 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} c_{11} = 11.193, c_{12} = 0.144, \\ c_{13} = 1.848, \lambda = 0.025 \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 S ：貯留高 (mm)、 t ：時間 (h)、 r ：観測雨量 (mm/h)、 q ：計算流出高 (mm/h)、 b ：損失高 (mm/h)、 q_0 ：基底流出高 (mm/h)、 q_B ：初期流出高 (mm/h)、 λ ：減衰係数、 A ：流域面積 (km^2)、 \bar{r} ：平均雨量強度 (mm/h)、 k_{11} 、 k_{12} ：貯留係数、 k_{13} ：損失係数、 p_1 、 p_2 ：貯留指数 ($p_1=0.6$ 、 $p_2=0.4648$)、 c_{11} 、 c_{12} 、 c_{13} ：モデルパラメータを示す。

(2) 河道追跡計算

河道追跡計算及び氾濫解析は、(株)コンピューターサイエンス社製の平面 2 次元氾濫解析システムを用いた。千歳川における河道追跡計算は、(4)式に示す一次元不定流¹³⁾により実施する。

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u^2}{g} + h \cos \theta \right) = I_o - I_f \\ I_o = \sin \theta \quad , \quad I_f = n^2 u^2 / R^{4/3} \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 A : 河川断面積 (m^2)、 Q : 流量 (m^3/s)、 q : 単位幅当たりの横流入量 (m^2/s)、 t : 時間 (sec)、 g : 重力加速度 (m/s^2)、 x : 流下方向距離 (m)、 u : 流速 (m/s)、 h : 水深 (m)、 $I_o = \sin \theta$: 水路勾配、 θ : 水路傾斜角、 I_f : 摩擦勾配、 n : マニング粗度係数、 R : 径深 (m) である。

河道の計算は、千歳川本川は図 4.4 左に示すように、水深方向に 20 分割した断面特性（水深 H ，断面積 A ，水面幅 B ，径深 R ）を与えて計算する。支川は、図 4.4 右に示すように、水路モデルと呼ぶが、千歳川と同様に一次元不定流計算とし、断面特性は矩形断面に置換えている。

置換え方法は、最深河床高から堤防高以下の河積を求め、河積から矩形断面の川幅を算出した。また、千歳川に架る橋脚は、水深方向に 20 分割した断面特性の河積から橋脚幅を差し引くことで障害面積を考慮した。

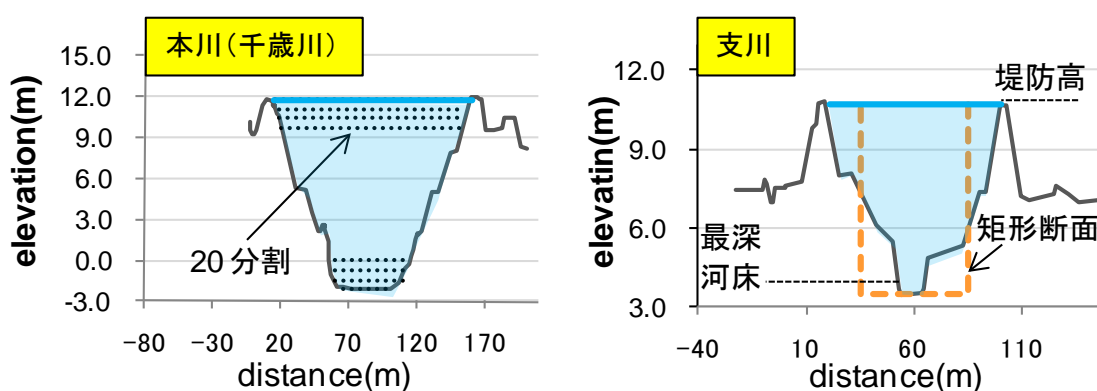


図 4.4 本川・支川断面の取り扱い

再現解析において考慮した排水機場を表 4.2 に示す。排水機場は、昭和 56 洪水当時に存在した排水機場を考慮した。また、本川・支川の上流端に与える流量や、考慮した支川，樋門や排水機場の配置を示したモデル系統図を図 4.5 に示す。

表 4.2 再現解析で考慮した排水機場

排水機場	竣工年	位置		排水最大	運転開始	運転停止
	(年)	排水先	km	能力 (m ³ /s)	水位 (m)	水位 (m)
上江別	1971	千歳川	左岸2.6km	16.0	6.36	5.86
江別太	1971	千歳川	右岸3.6km	4.26	6.15	5.30
登満別	1972	千歳川	左岸12.3km	16.0	6.70	5.60
中の沢	1965	千歳川	左岸18.0km	4.33	4.15	4.15
南9号	1968	千歳川	右岸25.4km	13.0	4.80	4.30
馬追運河	1968	旧夕張川	左岸3.2km	40.0	4.30	3.80

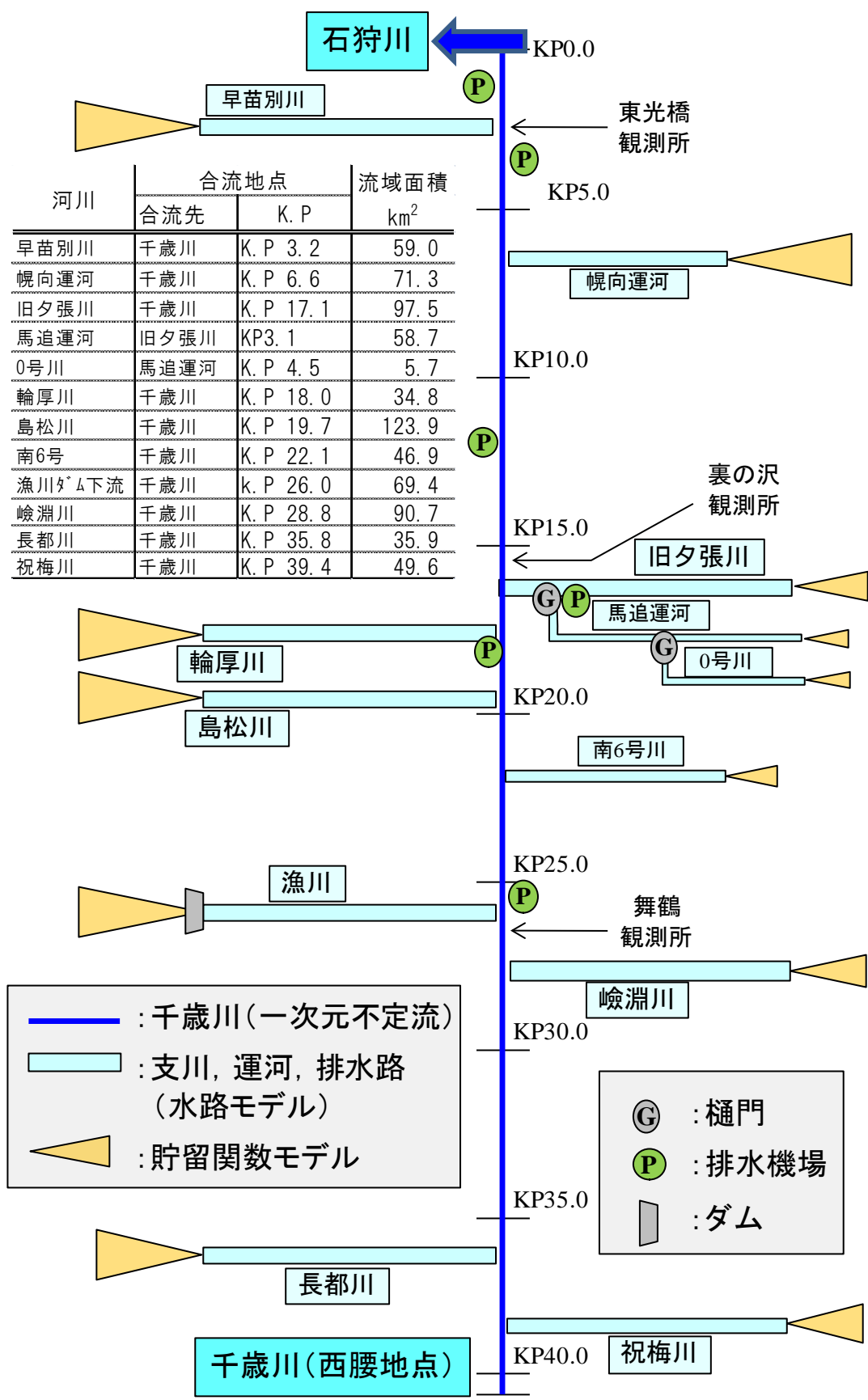


図 4.5 千歳川モデル系統図

(3) 氾濫解析

氾濫解析は、(5)式に示す平面二次元不定流¹³⁾により計算する。地形データは、国土数値情報 3 次メッシュ (250m) を適用したが、堤防沿いの地盤高は、メッシュ標高が実際よりも高い場合に氾濫量を過少評価するため、横断測量データや 5m メッシュの基盤地図情報で補正した。河道と氾濫原との接続は、概ね 200m ごとに計算される千歳川の不定流計算水位が堤防高を越えた場合に、本間の越流公式により越水量を計算し氾濫原に与える。破堤敷き高は、堤内地盤高か高水敷高の高い方とし、越水・破堤幅は、既存資料¹⁴⁾、や写真¹⁵⁾を参考にした。

ここで、昭和 56 年洪水は、千歳川本川は破堤の報告は無く一部の越水と、支川の越水・破堤¹⁴⁾であるため、計算の再現確認は河道水位と浸水区域で行った。平成 13 年洪水は、千歳川流域で大きな浸水被害は生じていないため、計算の再現確認は河道水位で行った。

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uM) + \frac{\partial}{\partial y}(vM) = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \tau_{bx} \\ \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uN) + \frac{\partial}{\partial y}(vN) = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \tau_{by} \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 H : 水位 (m), h : 水深 (m), M : x 方向フラックス (m^2/s), N : y 方向フラックス (m^2/s), u : x 方向流速 (m/s), v : y 方向流速 (m/s), ρ : 水の密度 (kg/m^3), τ_{bx} , τ_{by} : xy 方向のせん断力 (N/m^2), g : 重力加速度 (m/s^2) を示す。

(4) 樋門・排水機場の操作

排水機場の計算は、図 4.7 に示すように樋門操作と連動させ、内水位（支川）が外水位（本川）よりも高ければ樋門から自然排水し、内水位が外水位より低ければ樋門を閉めて排水機場により強制排水する。

これらの条件は、水門処理方式の早苗別川，幌向運河，南 6 号川，馬追運河の 4 河川について考慮し，その他の中小規模の樋門については閉扉し，背水影響は無いとして扱った。

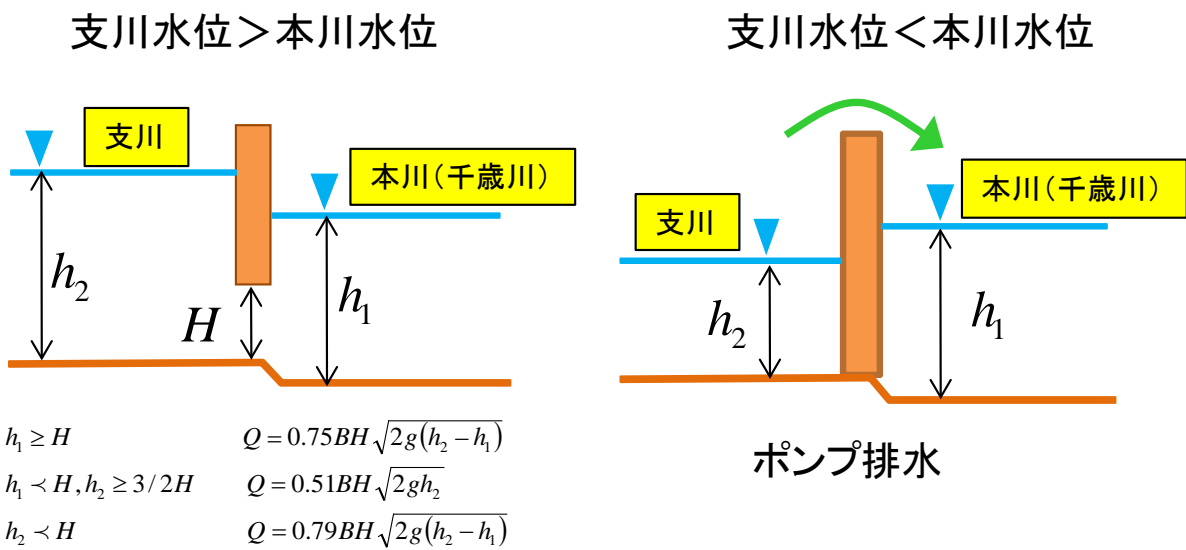


図 4.7 樋門・排水機場の操作

(5) 盛土構造物

氾濫原にある盛土構造物（図 4.7）は，浸水面積や浸水深に影響を与えるため，平面二次元不定流の中で，主要な道路や水路の盛土を考慮した．具体的には，道央自動車道，裏の沢川堤防，南長沼用水路堤防（嶮淵川から南 9 号川へ南北に横断する盛土）について考慮した．計算は，(6)式の台形堰の完全越流公式および潜り越流公式によって流量計算を行った．

$$\begin{aligned} q &= 1.55h_1^{3/2} && \text{(完全越流 : } h_2/h_1 < 2/3) \\ q &= 4.03h_2\sqrt{h_1-h_2} && \text{(潜り越流 : } h_2/h_1 \geq 2/3) \end{aligned} \tag{6}$$

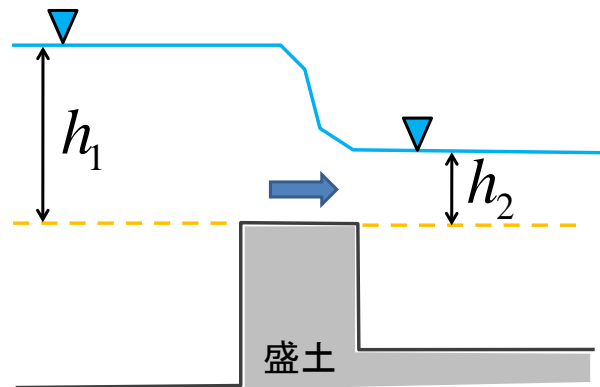


図 4.7 盛土構造物

4.4 解析事例

(1) 解析条件

既往の主要洪水に 2 ケースについて再現解析を実施し、モデルの妥当性について検討した。1 洪水目は、石狩川水系における観測史上最大の洪水である昭和 56 年洪水とし、2 洪水目は、平成以降の大規模出水である平成 13 年洪水を対象とした。また、それぞれの洪水についての河道断面条件、下流および流端の境界条件等について表 4.3 に整理した。ここで、昭和 56 年洪水は、千歳川本川は破堤の報告は無く一部の越水と、支川の越水・破堤¹⁴⁾であるため、計算の再現確認は河道水位と浸水区域で行った。平成 13 年洪水は、千歳川流域で大きな浸水被害は生じていないため、計算の再現確認は河道水位で行った。

表 4.3 計算条件

計算領域		計算条件	H13洪水	S56洪水	内容
河道 計算	千歳川	計算手法	一次元不定流 (越水無し)	一次元不定流 (越水有り)	
		河道断面	平成12年	昭和55年	一般河川断面
		下流端水位	Hp=6.28m	Hp=9.23m	千歳川の起算水位は、石狩大橋観測水位を河床勾配を用いて補正し算出した
		上流端流量	Qp=106m ³ /s	Qp=94m ³ /s	西越(KP40.6)
		粗度係数	n=0.025~ 0.035	n=0.025~ 0.035	計画粗度(河川整備計画)
	支川	計算手法	一次元不定流 (越水無し)	一次元不定流 (越水有り)	
		河道断面	旧夕張川:H12年 輪厚川:H12年 島松川:H12年 漁川:H12年 嶮淵川:H12年 祝梅川:H12年 運河,排水路: 5mメッシュ地形	旧夕張川:S53年 輪厚川:H12年 島松川:S55年 漁川:S55年 嶮淵川:H12年 祝梅川:H12年 運河,排水路: 5mメッシュ地形	矩形断面へ置換え
		計算手法	氾濫が小規模のため計算しない	二次元不定流 (内水外水一体)	x方向:80メッシュ y方向:170メッシュ 合計:13,600メッシュ
		地盤高		250m(国土数値情報3次メッシュ)	横断図,5mメッシュで一部補正
		粗度係数		n=0.025	水田・畑に相当
氾濫原	破堤・越水		図 4.2	写真,資料より	

(2) 最高水位の計算結果

千歳川の縦断的な最高水位の計算結果を図 4.8(1), (2)に示す. なお, 図 4.8(1)が平成 13 年洪水で, 図 4.8(2)が昭和 56 年洪水である. 千歳川にある 3 箇所の水位観測所 (東光橋, 裏の沢, 舞鶴) でみた再現性は良好である. 観測値と計算値の誤差は, 概ね 1~15cm 以内であった. 水位が計画高水位を越える大規模な洪水から, 中規模の洪水まで再現できていることが確認できた.

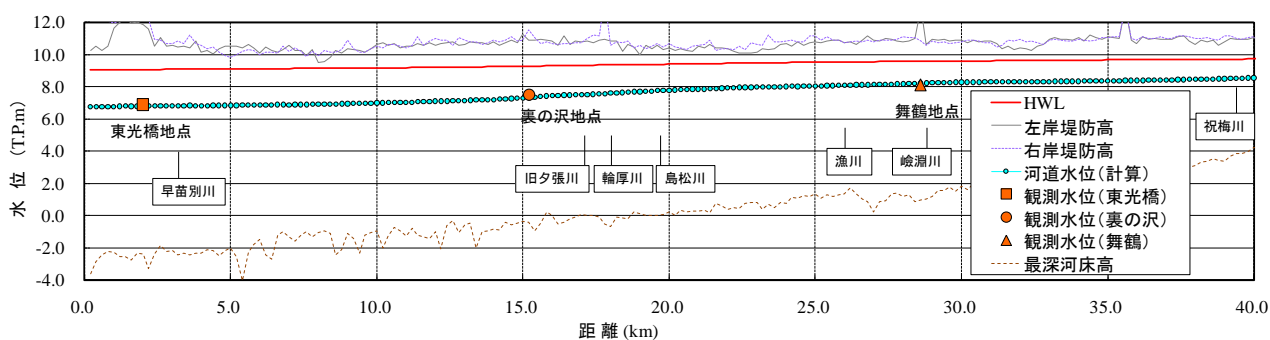


図 4.8(1) 平成 13 年洪水 水位縦断図 (最高水位)

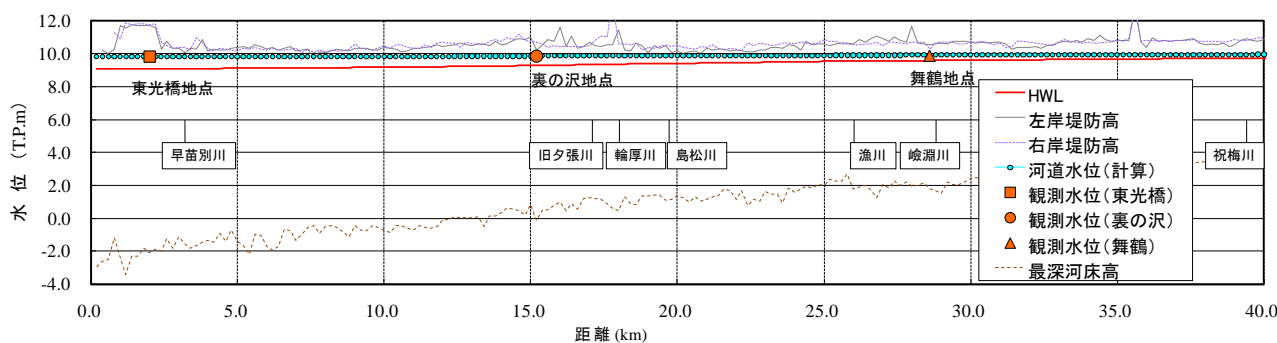


図 4.8(2) 昭和 56 年洪水 水位縦断図 (最高水位)

(3) 時系列水位の計算結果

時系列水位の計算結果を図 4.9(1), (2)に示す. 3箇所の水位観測所で, 概ね再現できているが, 裏の沢, 舞鶴の洪水低減期において再現性がやや低下している. これは, 入手可能であった雨量データが, 洪水ピーク後 5 時間までであり, それ以降の降雨をゼロで流出解析したため, 洪水低減期に差が生じたと考えられる.

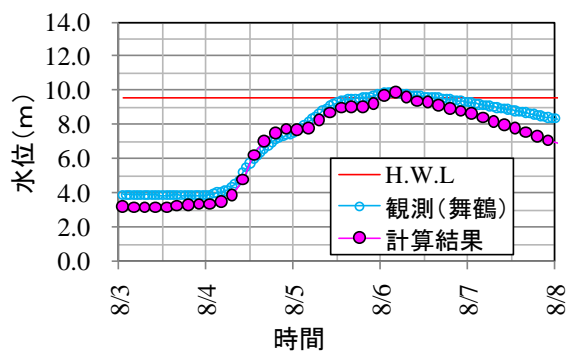
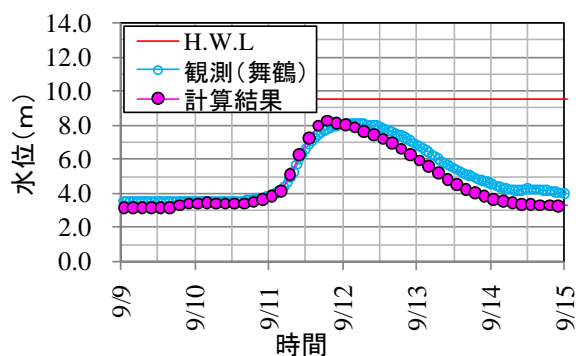
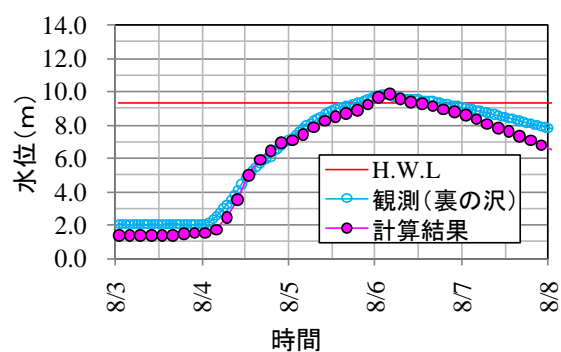
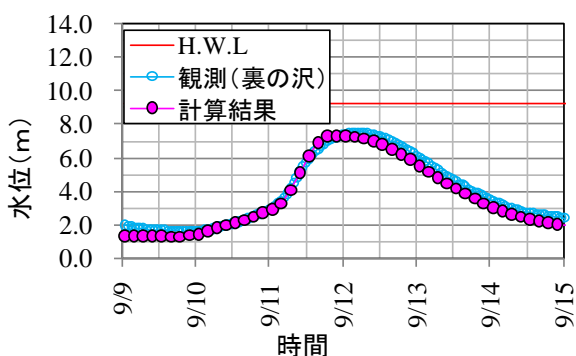
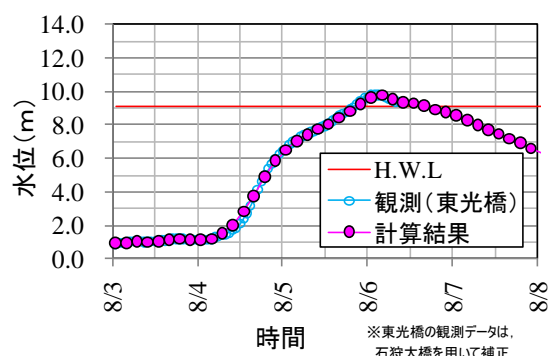
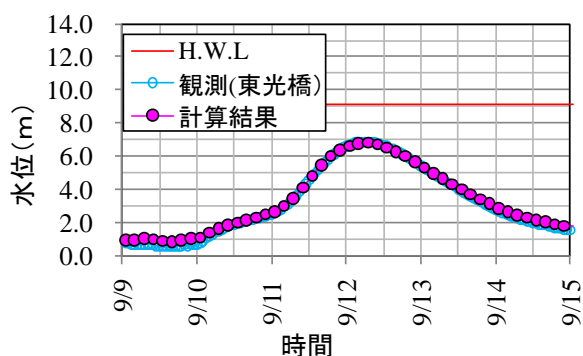


図 4.9(1) 平成 13 年洪水 時系列水位

図 4.9(2) 昭和 56 年洪水時 系列水位

(4) 最大浸水深

昭和 56 年洪水の再現計算結果を図 4.10 に示す。浸水面積は、実績¹⁰⁾の 192km²に対して、計算結果は 209km²で浸水区域を概ね再現できている。氾濫原の浸水深は、入手ができず記録写真¹⁵⁾からの推定だが良好な結果であった。

以上より、本研究の内水・外水一体の氾濫解析は、低平地河川の洪水・氾濫の様子を精度よく再現したと考える。

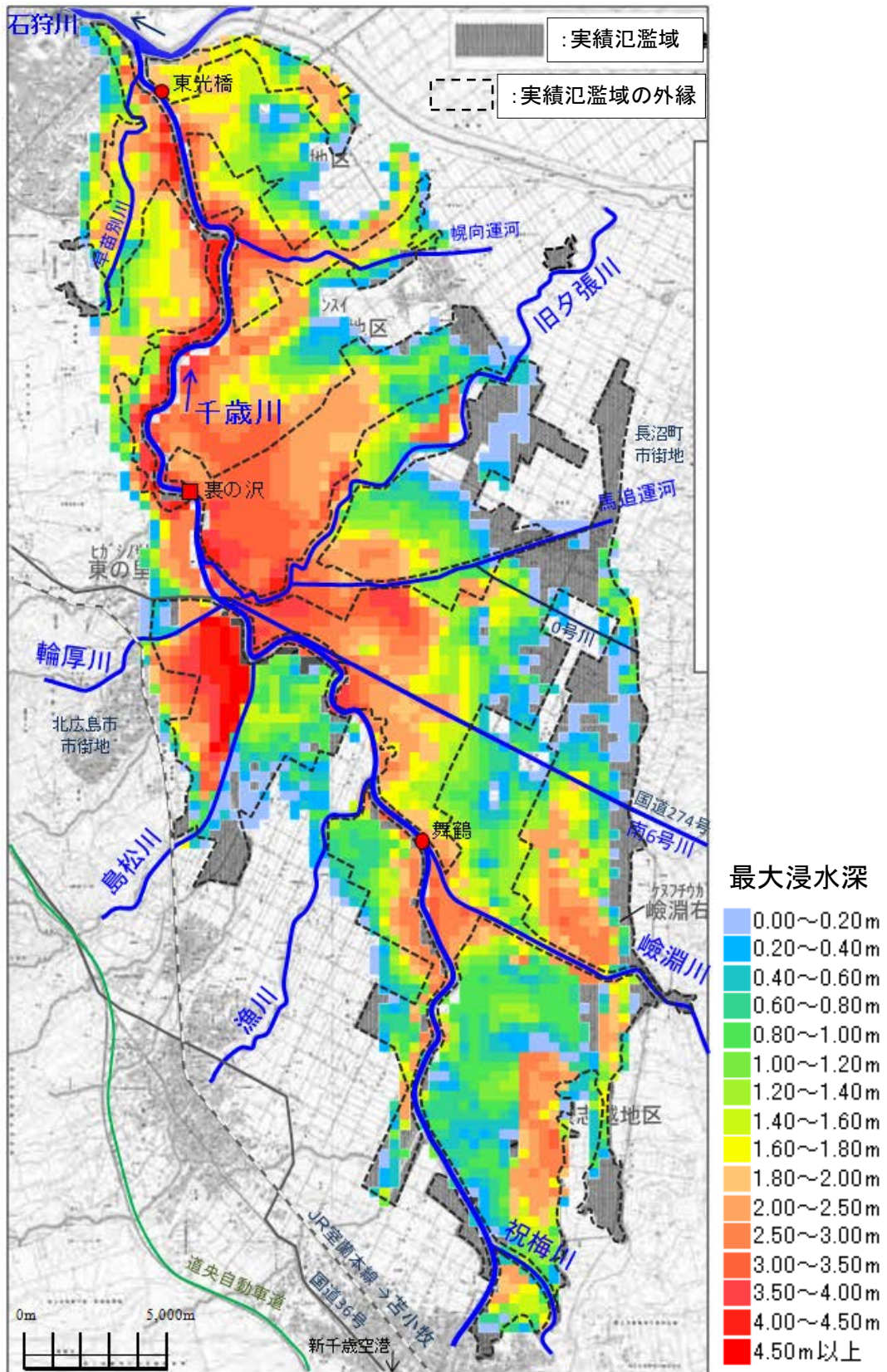


図 4.10 昭和 56 年洪水 再現計算結果 (最大浸水深)

4.5 本章のまとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 解析結果は、千歳川における河道の最高水位や時系列水位（波形）を精度よく再現できたと考え、洪水を再現できるモデルが構築できたと考える。
- (2) 内水・外水を一体化した氾濫解析モデルにより、大規模出水の浸水区域を概ね再現でき、浸水予測に適用できるモデルと考える。
- (3) 過度に複雑なモデルではないため、6日間の計算を40分で終える。このことは、リアルタイムの浸水予測に適し、河川管理施設の操作に有利である。

4.6 参考文献

- 1) 2015 年関東・東北豪雨災害 土木学会・地盤工学会 合同調査団関東グループ：平成 27 年 9 月関東・東北豪雨による関東地方災害調査報告書，pp. 1-
- 2) 土木学会 社会支援部門：2016 年 8 月 北海道豪雨災害調査団緊急報告会について<<http://committees.jsce.or.jp/report/node/136>>（アクセス日：2017/4/11）
- 3) 佐伯勇輔，鈴木英一，山口里美：石狩川流域の洪水被害特性，土木学会論文集 B1（水工学），Vol. 69, No. 4, I_1615-I_1620, 2013.
- 4) 中村徹立，佐々木淑充，木草浩一：都市域氾濫解析モデル活用ガイドライン（案）- 都市浸水 -，国土技術政策総合研究所資料，No. 202, 2004.
- 5) 関根正人，浅井晃一：「神田川流域を対象とした豪雨による浸水・氾濫に関する数値予測」，土木学会論文集 B1（水工学），Vol. 71, No. 4, I_1429- I_1434, 2015.
- 6) 佐山敬洋，建部祐哉，藤岡奨，牛山朋來，萬矢敦啓，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, pp14-29. 2013.
- 7) 秋山壽一郎，白石清隆，重枝未玲，坂田治義：洪水調節とポンプ排水を考慮した外水処理モデルの六角川流域への提供，土木学会論文集 B1（水工学），Vol. 72, 1249-1254, 2016.
- 8) 福岡捷二，昆敏之，岡村誠司：鶴見川多目的遊水地の洪水節効果の評価－河道の水面形の時間変化を考慮した非定常平面二次元解析法の適用－，土木学会論文集 B, Vol. 63, No. 3, pp. 238-248, 2007.
- 9) 松本敬司，中井隆亮，福岡捷二，須見徹太郎：渡良瀬遊水地の洪水調節機能とその課題の考察，土木学会論文集 B1（水工学），Vol. 70 (2014) No. 4 p. I_1477-I_1482, 2014.
- 10) 北海道開発局：石狩川水系千歳川河川整備計画，pp. 1-16, 2005.
- 11) (財)北海道河川防災センター・研究所：「実時間洪水予測システム理論」解説書，2004.
- 12) iRIC Project：iRIC SRM<<http://i-ric.org/ja/>>（アクセス日：2017/4/11）
- 13) 栗城稔，末次忠司，海野仁，田中義人，小林裕明：氾濫シミュレーションマニュアル（案），－シミュレーションの手引き及び新モデルの検証－，土木研究所資料，第 3400 号，1996.
- 14) 北海道開発局：千歳川放水路計画に関する技術報告，2-4p, 1994.
- 15) 石狩川振興財団：石狩川流域発展の礎. pp. 104-127, 2002.

第5章 超過洪水による氾濫被害を軽減するための

治水施設の総合的な効果分析手法

5.1 超過洪水の外力設定

本節では、超過洪水によって発生する氾濫被害を軽減できるような施設運用について分析できる手法の開発を目的とし、具体的には、遊水地群、排水機場、樋門といった施設運用を勘案し、内水・外水を一体化した氾濫解析が行えるような手法を提案する。

そこで、超過洪水の影響を検討するため、外力となる降雨の設定は、IPCC 第5次評価報告書(AR5)の気候変動予測(図 5.1)¹⁾を参考とした。IPCC AR5によると、地球温暖化対策を十分にしなかった場合のRCP8.5シナリオは、日本周辺海域では21世紀後半に年降水量が20%程度増加すると予測されている(図 5.2)¹⁾。そこで、本研究では、昭和56年洪水の流域平均雨量を1.2倍($339 \times 1.2 = 407\text{mm}/3\text{日}$)した超過洪水を想定し、治水施設の整備状況を踏まえた氾濫解析を行った。また、氾濫解析で与える時系列の波形は、昭和56年洪水の降雨波形を引き延ばし、流出解析の入力値として与えた。

なお、想定した降雨は、昭和56年洪水の降雨を1.2倍すると407mm/3日となるが、2016年8月北海道豪雨では500mm/3日を超える雨量であったことを考慮すると、極端な想定ではない。また、昭和56年洪水においても千歳川流域近傍の岩見沢で410mm/3日を記録したことからも、発生しうる降雨量であると考えられる(図 5.3, 表 5.1)。

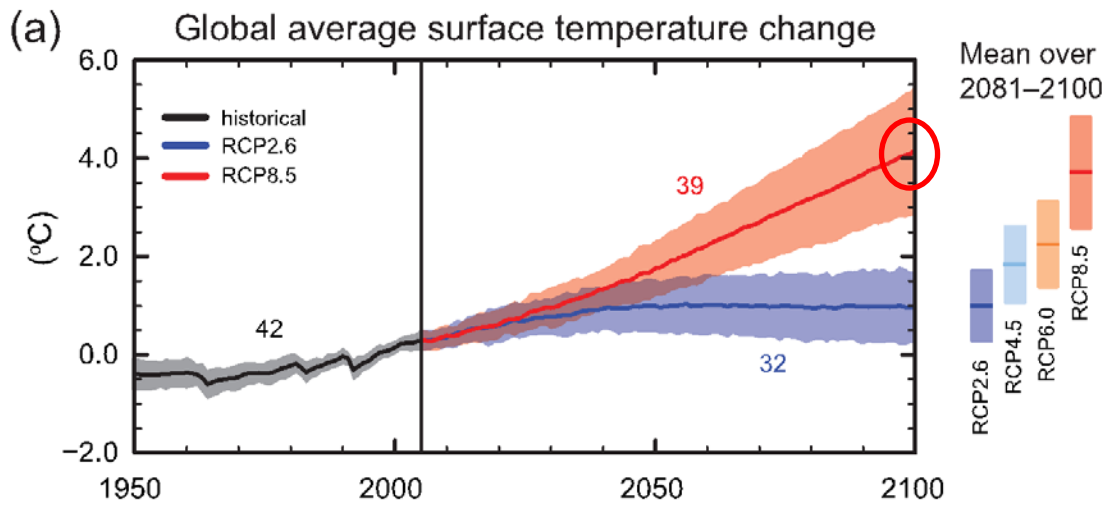


図 5.1 各シナリオによる平均上昇気温¹⁾

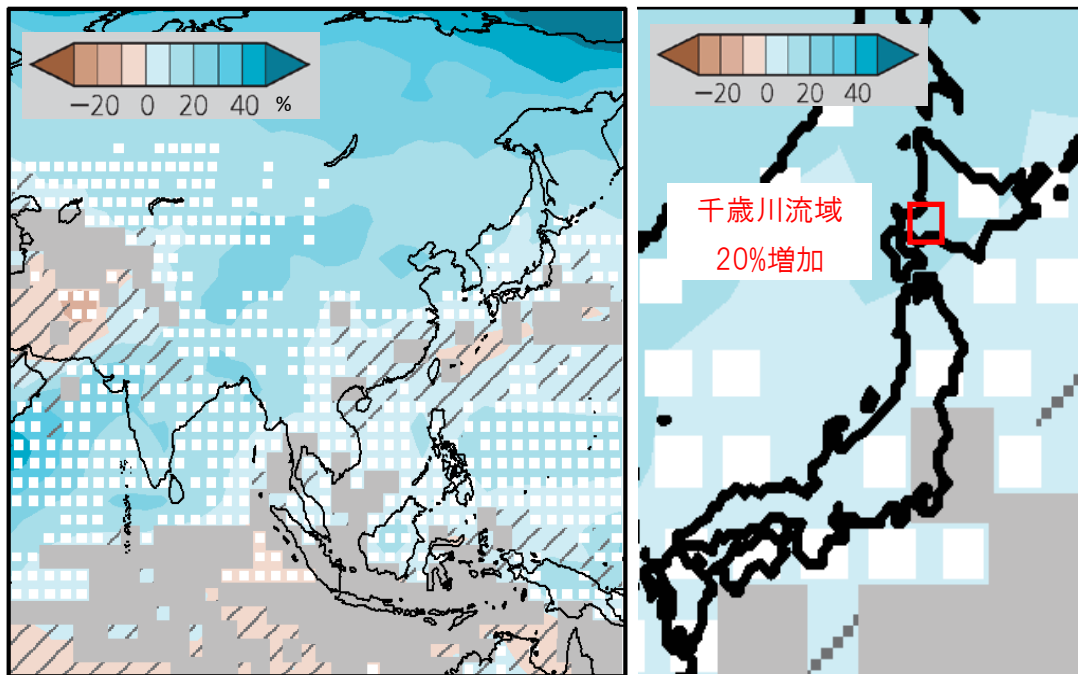


図 5.2 IPCC RCP8.5 シナリの降雨増加率（年平均）¹⁾

流出解析は、これまで経験したことのない降雨を想定しているため、モデルパラメータ値 (c_{11} , c_{12} , c_{13}) を検討する必要がある。そこで、図 5.3 に昭和 56 年洪水の実績の等雨量線図を示す。等雨量線図より昭和 56 年洪水の雨量は、千歳川流域で 339mm/3 日、千歳川の近郊にある岩見沢では 410mm/3 日であった。昭和 56 年洪水で最適化されたパラメータ²⁾は、岩見沢を含む石狩川全体の流域で最適化したパラメータであるため、410mm/3 日程度まで適用できると考えられる。そのため、超過洪水の流出解析で用いたパラメータ値 (c_{11} , c_{12} , c_{13}) は、昭和 56 年洪水と同様に昭和 56 年洪水の石狩川流域で定められた最適値を用いることとした (表 5.1)。

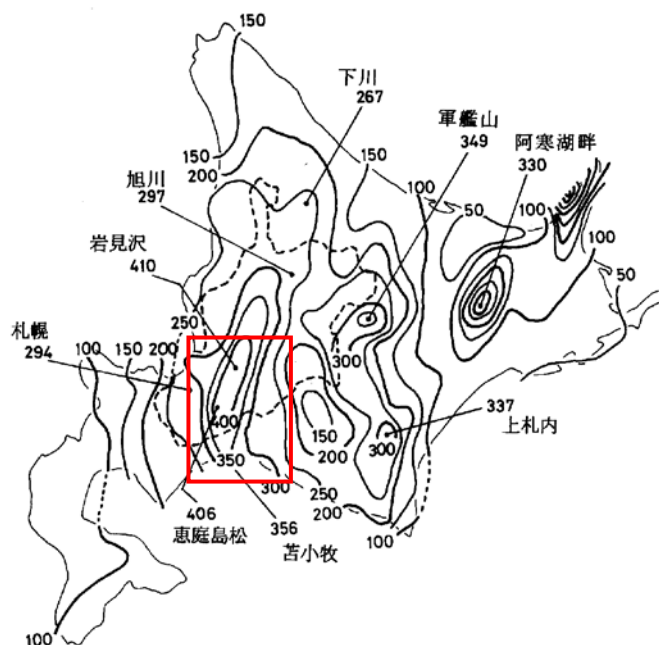


図 5.3 昭和 56 年洪水等雨量線図(災害時気象速報, 札幌管区气象台)

表 5.1 超過洪水の流出解析に用いたパラメータ

洪水	昭和 56 年洪水		超過洪水
流域	①千歳川流域 (石狩川流域内)	②岩見沢(千歳川の 20km 北 東, 石狩川流域内)	③千歳川 (石狩川流域の一部)
総雨量	339mm/3 日	410mm/3 日	407mm/3 日
パラメータ	パラメータは、①, ②の流域を含んで設定 されている		適用範囲と判断した

5.2 治水施設の概要

超過洪水による氾濫被害を軽減するための治水施設の総合的な効果分析を行うため、漁川ダム、6つの遊水地群、排水機場、樋門といった治水施設の運用を考慮し、内水・外水を一体化した氾濫解析を行った。図 5.4 は複数ある治水施設を総合的に効果したモデルの概念図を示している。

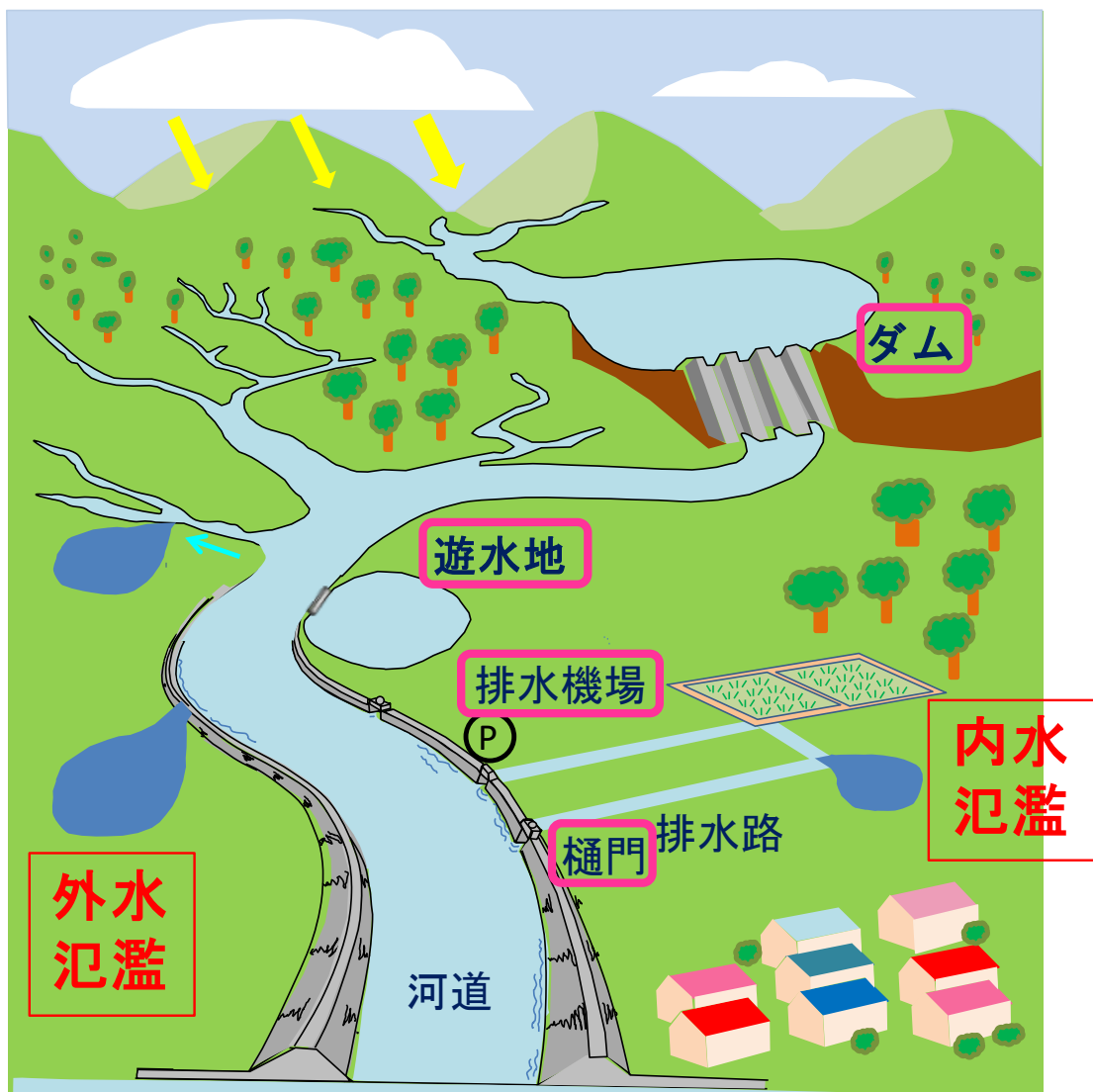


図 5.4 ダム、遊水地群、排水機場、樋門操作を考慮した内水・外水を一体化した氾濫解析モデルの概念図

(1) 遊水地群

千歳川は、6つの遊水地群についての整備が進められ、2008年～2019年間に建設予定である。遊水地の洪水調節容量等の諸元を表 5.2³⁾に示す。現在（平成29.4）は、舞鶴遊水地が完成している（図 5.5）⁴⁾。この6つの遊水地群による治水対策は、全国的にも前例がなく、高度な河川管理施設の操作が必要である。このような治水対策が選択された理由は、千歳川が石狩川の高い背水影響を長時間受け、破堤の危険性が高い課題があるためである。そのため、当初（平成4年頃）、北海道開発局は、石狩川の影響を水門により断ち、放水路により太平洋へ放流する千歳川放水路計画が立案した。しかしながら、地元流域は賛成、漁業団体や自然保護団体は反対の意見を示し、事業ができない状態が続き、その後、千歳川流域治水対策検討委員会（北海道開発局と北海道が共同で設定した検討委員会）において、千歳川の治水は、堤防強化や遊水地併用する面的な治水対策を目指すに至った背景がある（表 5.3）⁴⁾。

表 5.2 遊水地群の諸元³⁾

遊水地名		江別太	晩翠	東の里	北島	根志越	舞鶴	合計
地点KP		5.0	8.2	19.2	20.4	37.8	5.0(嶮)	
計画築堤高	m	11.06						
計画高水位	m	9.11	9.15	9.38	9.41	9.70	9.87	
越流堤高	m	8.40	8.40	8.70	8.70	9.10	9.10	
越流堤延長	m	350						
洪水調節容量	百万m ³	5.5	5.4	6.2	9.5	10.6	8.2	45
面積(計画高水位)	万m ²	134.0	125.8	120.4	170.1	190.8	261.7	1,003

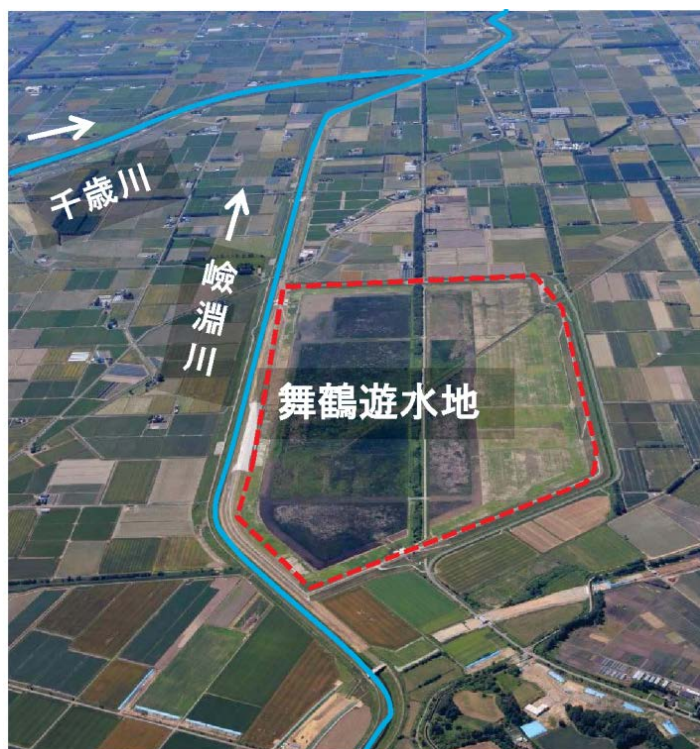
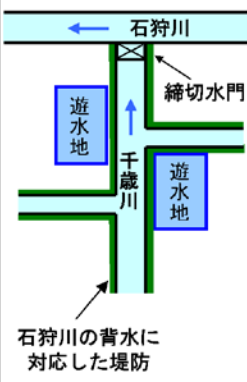

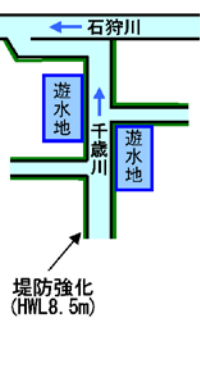
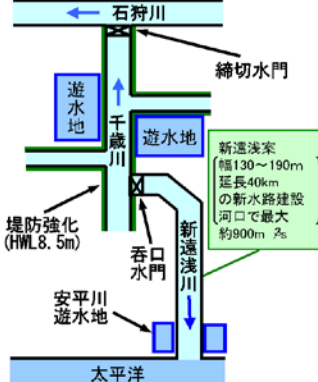


図 5.5 舞鶴遊水地 (北海道開発局ホームページ⁴⁾)

表 5.3 千歳川遊水地群の整備に至った経緯⁴⁾

昭和63年～	放水路事業着手。地元自治体等からは賛成、漁業団体や自然保護団体等からは反対の意見があり、事業を進めることができない状態が継続。
平成9～11年	「千歳川流域治水対策検討委員会」の提言を受け、知事が“流域内での治水対策が必要”と意見書を提出し、国は放水路事業を中止。
平成11～14年	国、道の共同設置による「千歳川流域治水対策全体計画検討委員会」において、“堤防強化(遊水地併用)案を選択すべき”と提言。
平成17年4月	石狩川水系千歳川河川整備計画を策定。

ケース1 堤防強化 (遊水地併用)案	ケース2 千歳川放水路計画	ケース3 合流点对策案	ケース4 新遠浅川案
遊水地による洪水調節と併せて石狩川の背水の影響を長時間受けることに対応した堤防整備	石狩川と縁を切り、太平洋への新水路により洪水を処理	合流点を下流に付け替えることにより洪水を処理	石狩川と縁を切り、太平洋への新水路と遊水地により洪水を処理
目標水位 9.45m	目標水位 7.5m	目標水位 8.5m	目標水位 8.5m
千歳川流域治水対策全体計画委員会での評価(H14.3) 内水被害軽減効果等に課題があるが、実行可能性、早期の効果発現等を勘案し、同案を選択すべき。	千歳川流域治水対策検討委員会での評価(H11.6) 基本的に合流点を含めた流域内での総合治水対策を推進すべき。千歳川放水路計画は検討対象外。	千歳川流域治水対策全体計画委員会での評価(H14.3) 江別市のまちづくり等、社会的影響が大きい。	千歳川流域治水対策全体計画委員会での評価(H14.3) 治水効果に優れること等から河川の全体計画として望ましい対策だが、漁業、環境等関係者の早期合意が困難。
			

(2) 排水機場および樋門操作

千歳川は、流域の地形的特性から内水氾濫が頻発することから、流域内には河川管理者以外が管理する排水機も含め、40 箇所以上、合計 300m³/s 以上もの排水機場が設置されている。そこで、昭和 56 年洪水時に存在したと考えられる 6 箇所に概ね 10m³/s 以上の排水機場を加えた 11 箇所を考慮した（図 5.6）⁵⁾。また、排水機場の排水能力を含む諸元について表 5.4³⁾に示す。樋門操作は、4 章の再現計算と同様、内水位（支川）が外水位（本川）より高ければ自然排水し、内水位（支川）が外水位より低ければ樋門を閉じる操作を行うものとした。

表 5.4 排水機場の諸元³⁾

NO	排水機場	竣工 (年)	位置		排水 能力 (m ³ /s)	運転 開始 水位 (m)	運転 停止 水位 (m)
			排水先	位置			
1	泉の沼	1993	千歳川	KP2.4km, R	6.0	5.10	4.10
2	上江別	1971	千歳川	KP2.6km, L	16.0	6.36	5.86
3	早苗別	1998	千歳川	KP3.3km, L	15.0	5.10	4.10
4	江別太	1971	千歳川	KP3.6km, R	4.26	6.15	5.30
5	幌向運河	1993	千歳川	KP6.8km, R	39.48	5.15	-
6	登満別	1972	千歳川	KP12.3km, L	16.0	6.70	5.60
7	中の沢	1965	千歳川	KP18.0km, L	4.33	4.15	4.15
8	南6号	2001	千歳川	KP22.2km, R	26.0	3.90	3.40
9	南9号	1968	千歳川	KP25.4km, R	13.0	4.80	4.30
10	漁太川	1998	千歳川	KP27.1km, L	10.0	5.20	4.70
11	馬追運河	1968	旧夕張川	KP3.2km, L	40.0	4.30	3.80

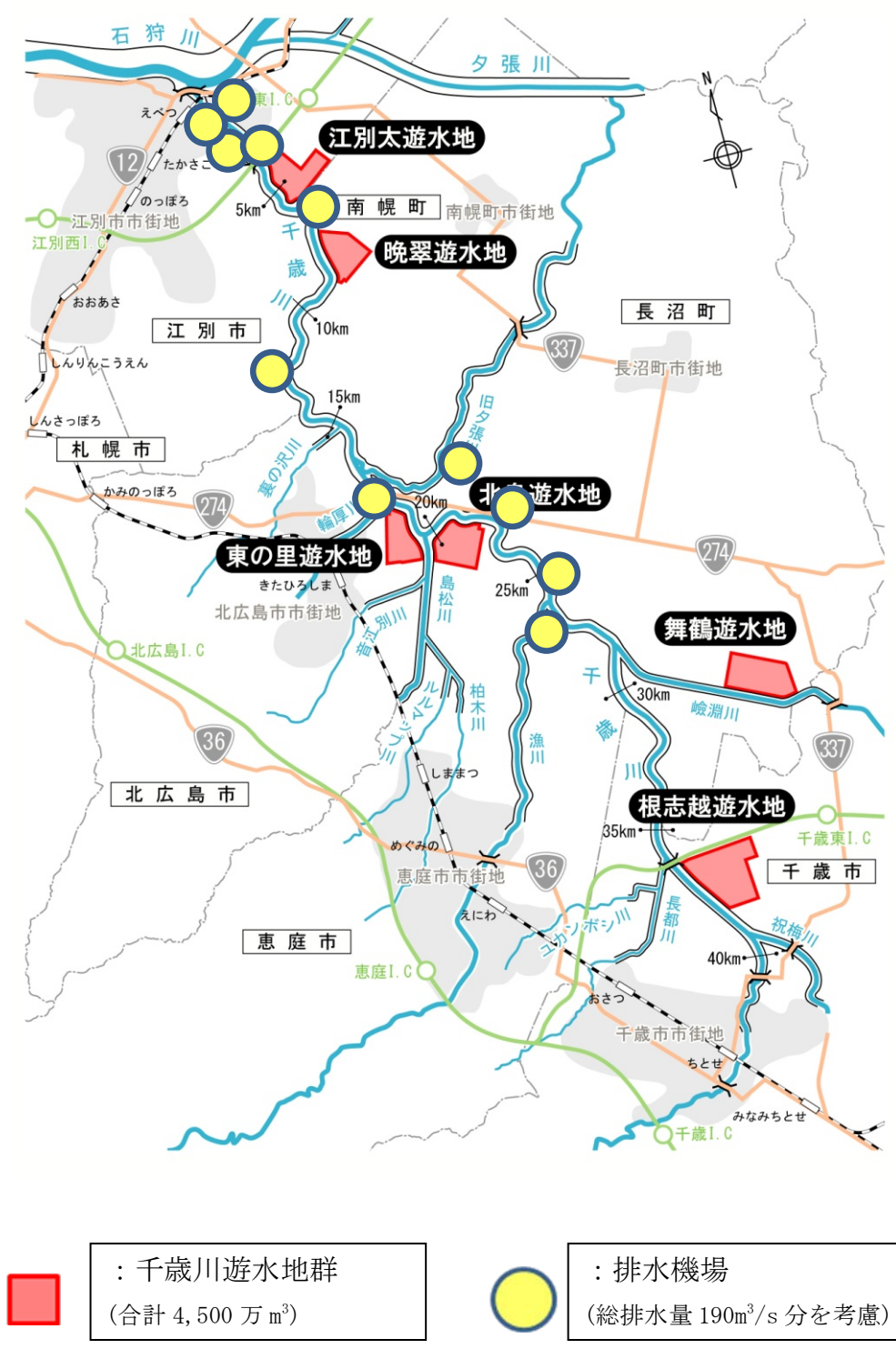


図 5.6 千歳川遊水地群と排水機場⁵⁾

(3) 漁川ダム

千歳川の支川を流れる漁川には、上流域に漁川ダムがある。漁川ダムは、北海道開発局により、1980年に完成した多目的ダム（洪水調節、上水道）であり、遊水地や河道整備による治水対策が中心である千歳川流域で唯一ある洪水調節機能を有するダムである（図 5.7）。漁川ダムの洪水調節の操作は、図 5.8 に示すように流入量に対し放流量が定まる、一定率一定量による洪水調節を行う。操作ルール式は(1)式が適用される。



図 5.7 漁川ダム（国土交通省札幌開発建設部ホームページ⁶⁾）

$$Q_{out} = \frac{240}{540}(Q_{in} - 60) + 60 \quad (1)$$

ここで、 Q_{out} ：放流量(m^3/s)、 Q_{in} ：流入量(m^3/s)を示す。

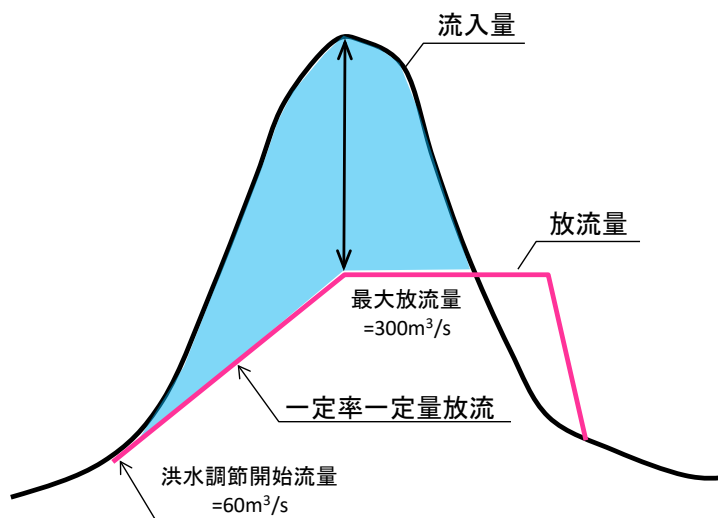


図 5.8 漁川ダムの洪水調節計画

5.3 解析条件

(1) 解析ケース

解析ケースについては，昭和 56 年洪水の 1.2 倍の降雨波形を与え，表 5.5 に示すように遊水池と排水機の有無をケースとして，超過洪水による治水施設の効果について予測した。

表 5.5 解析ケース

ケース1: 治水施設無し	ケース2: 治水施設有り
S56.8洪水を1.2倍(407mm/3day)	同左
遊水池: 無し	遊水池無し: 6箇所
排水機場: 無し	排水機場: 11箇所(190m ³ /s)

(2) 数値解析条件

超過洪水による氾濫被害を軽減するための治水施設の総合的な効果分析を行う上で用いた氾濫解析モデルの計算条件を表 5.6 に示す。遊水地群, 排水機場, 樋門といった治水施設の運用を考慮した, 内水・外水を一体化した氾濫解析モデル系統図を図 5.9 に示す。氾濫解析モデルで, 遊水地の貯留に伴う本川の流量負担の軽減効果や, 排水機場により千歳川本川へ流量負担の影響などの相互作用について時々刻々と計算する。

なお, 千歳川の下流端水位は, 気候変動に伴い石狩川の水位上昇が予測される一方で, ダム群の再開発や河道掘削により水位低下を目指す治水計画(石狩川河川整備計画)があり, 相殺される可能性がある。そのため, 石狩川水位は, 昭和 56 年洪水と同様の水位と仮定した。

遊水地群の計算は, 河道の不定流計算水位が越流堤高を越えた時点で越流が開始し, 越流量は本間の越流公式により計算する。遊水地内は, メッシュを基にして二次元不定流計算を行い, 遊水地水位が越流堤高より高く, さらに河道水位が低ければ遊水地から河道へ戻る計算を行う。

破堤・越水条件については, 計画高水位を超えても破堤はしない条件とし, 本川・支川の越水氾濫を考慮するモデルとした。

表 5.6 氾濫解析条件

計算領域		計算条件	超過洪水解析	内容
雨量			407mm/3日	
河道計算	千歳川	計算手法	一次元不定流	
		河道断面	平成17年	一般河川断面
		下流端水位	Hp=9.23m	
		上流端流量	Qp=109m ³ /s	西越(KP40.6)
		粗度係数	n=0.025~0.035	計画粗度
	支川	計算手法	一次元不定流	
	河道断面	旧夕張川, 輪厚川, 島松川, 漁川, 嶮淵川, 祝梅川: H17年	・支川は矩形断面 ・運河と排水路は5mメッシュから作成	
氾濫原		計算手法	二次元不定流	80×170メッシュ
		地盤高	250m	横断, 5mメッシュで補正
		粗度係数	n=0.025	水田・畑に相当
		排水機場	ケース1無し ケース2有り	
		遊水地	ケース1無し ケース2有り	

5.4 超過洪水による治水施設の総合的な効果

(1) 最大浸水深

最大浸水深の結果について図 5.10 に示す。ケース 1（治水施設無し）の浸水面積は 248km²で、昭和 56 年洪水の実績に対して約 1.3 倍の浸水面積に拡大した。氾濫の要因は、支川流量の増加や、本川水位の上昇に伴う背水影響による支川の越水氾濫による影響が大きい。

次にケース 2（治水施設有り）は、浸水面積が 3km²と大幅に減少し、これは排水機場により支川流量の負担を軽減し支川の越水氾濫が減少したことに加え、拡散していた氾濫が遊水地群内に限定されたためである。なお、このときの河道の最高水位は、例えば KP4.0 では約 9.9m であり、堤防天端高（約 10.1m）から 20cm 程度低い水位であり満杯の状態であった（図 5.11）。

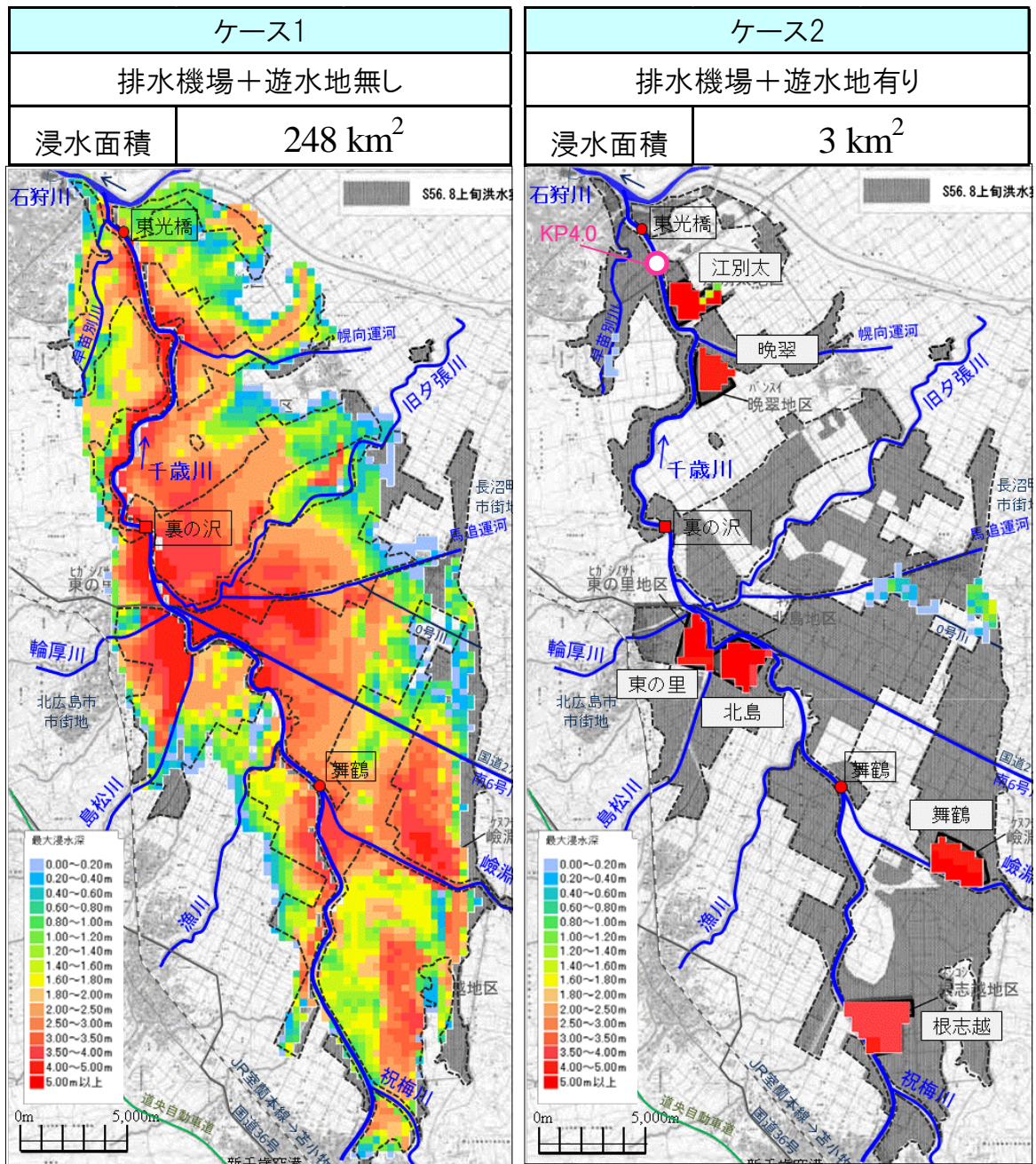


図 5.10 最大浸水深（左：遊水地・排水機場無し，右：遊水地・排水機場有り）

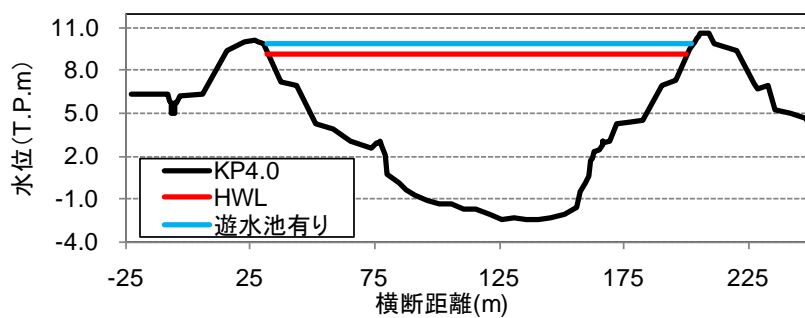


図 5.11 ケース 2 の水位状況 (KP4.0)

(2) 時系列浸水深

時系列の浸水深および河道水位（裏の沢地点，不定流計算水位）について，**図 5.12(1)～(9)**に示す．遊水地群の貯留状況は，8/5 15:00 頃に中上流にある東の里，北島，舞鶴，根志越の遊水地群においてほぼ同時刻に貯留がされ，9 時間後の 8/5 の 24:00 頃に下流にある晩水，江別太の遊水地群で貯留された状態となる．

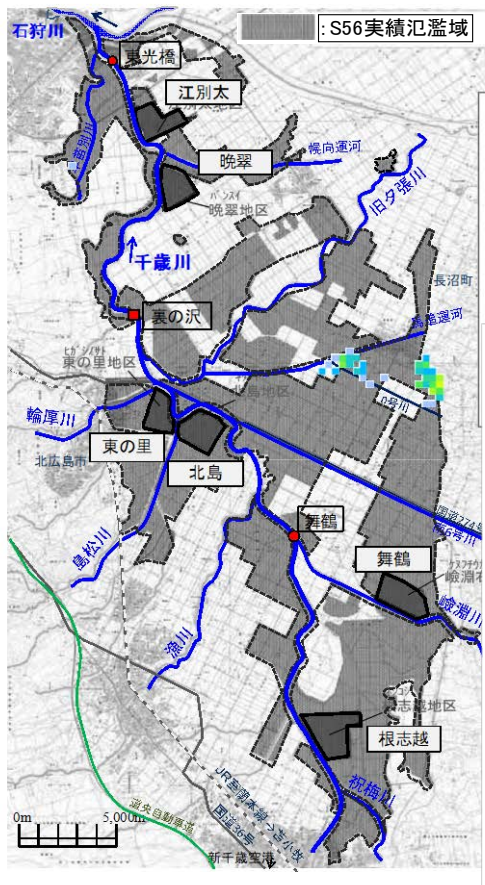
8/6 の 12:00 頃の時間でみると，東の里，北島の遊水地の貯留量が多く，周辺の北広島や恵庭市の市街地に対して氾濫被害を軽減する効果が把握できる．

また**図 5.13**に，東の沢遊水地について遊水地水位と河道水位の時系列変化を示した．その結果，遊水地への貯留が開始するのが，8/5 15:00 頃であり，最大貯留時（河道水位と遊水地の水位が等しくなる時）になるのが 8/6 21:00 頃であり，約 30 時間にわたり貯留効果を発揮することが確認できる．

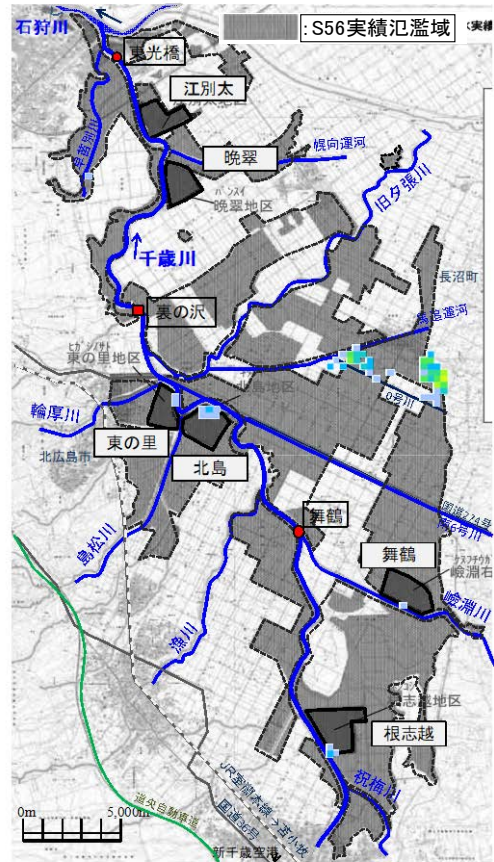
さらに，最大貯留に到達した後は，河道水位が低下するのに従って，徐々に遊水地水位も低下し，最終的には越流堤高で溜水する洪水の様子を再現できている．

以上より，本解析モデルは，今後，降雨パターンを変化させた場合についても，遊水地等の効果を含む総合的な治水機能について把握できる汎用性があるモデルであると考えられる．

8/5 12:00



8/5 15:00



8/5 15:00 : 東の沢, 北島, 舞鶴, 根志越の中・上流域の4遊水地で貯留開始

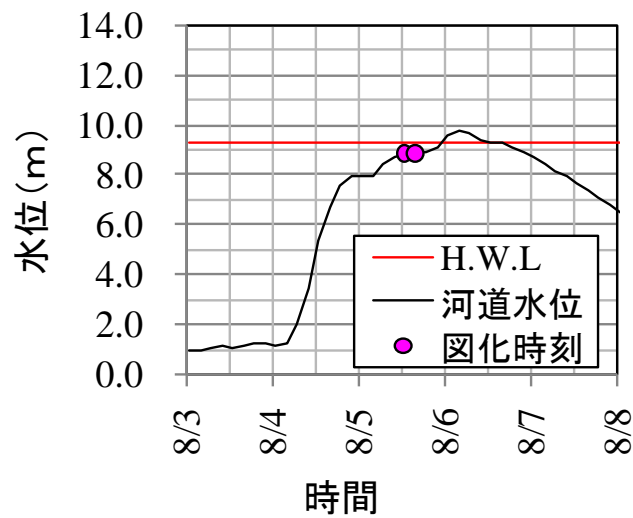


図 5.12(1) 浸水深の時系列変化

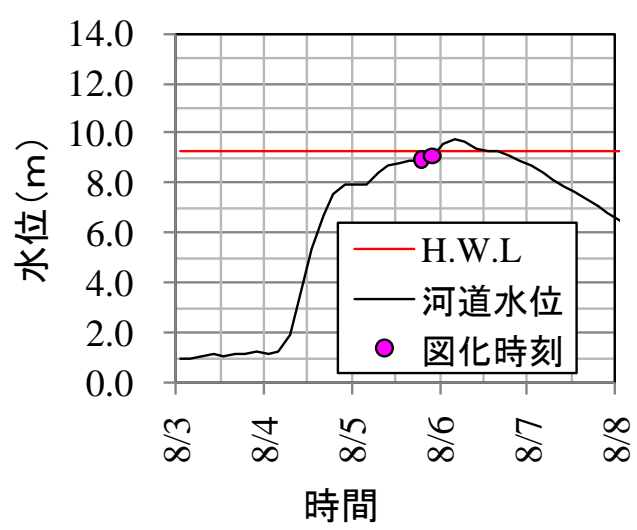
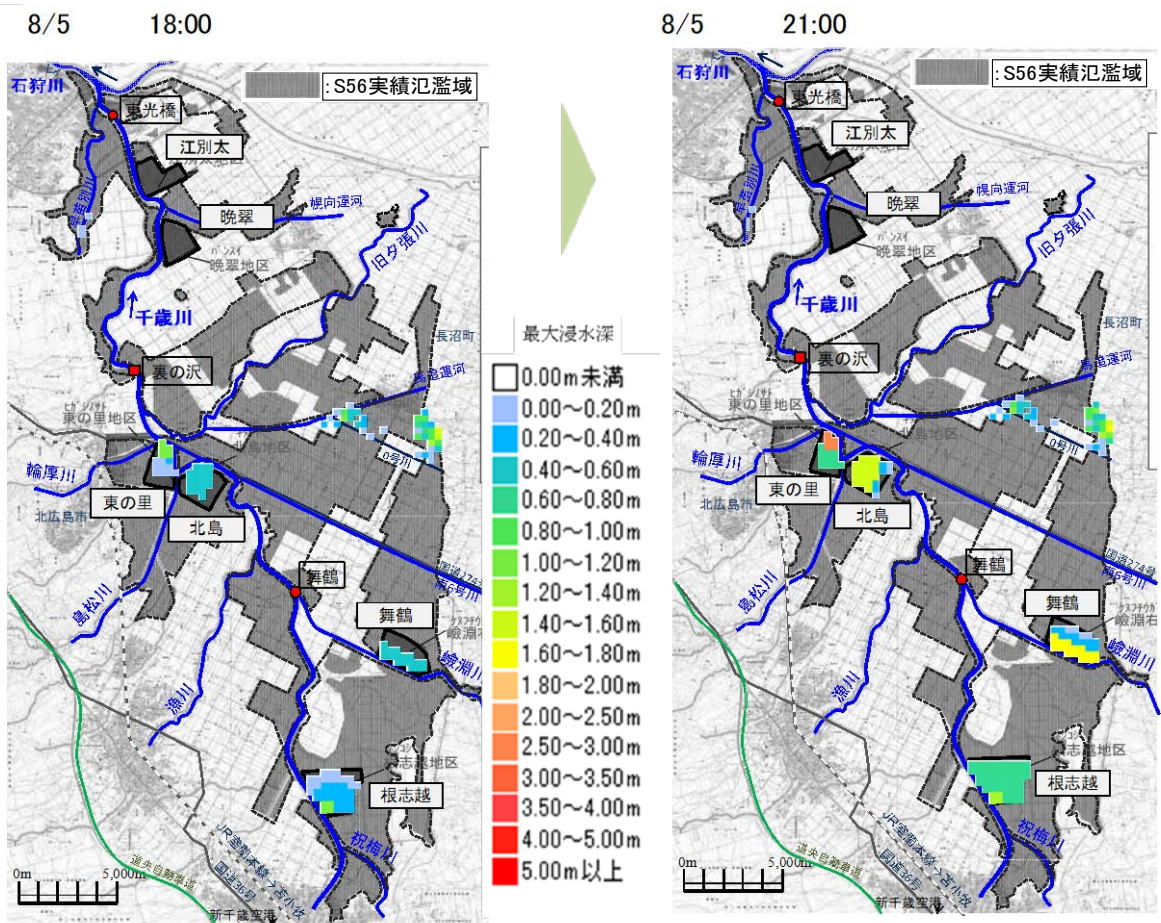
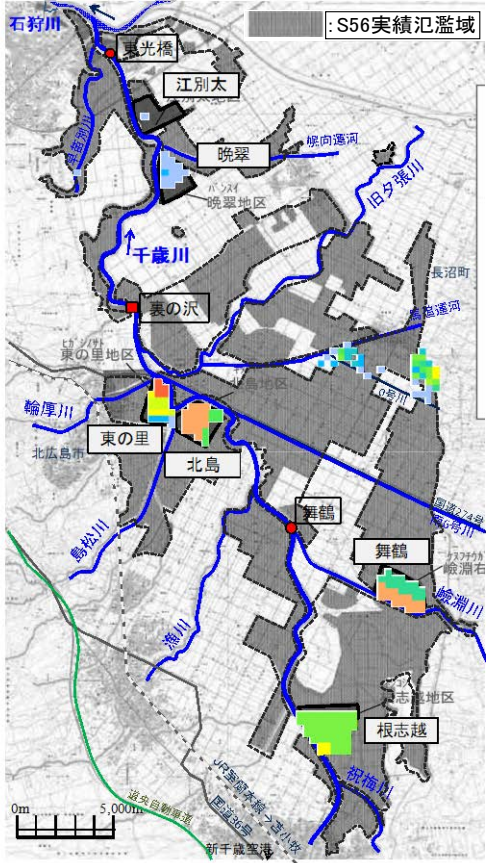


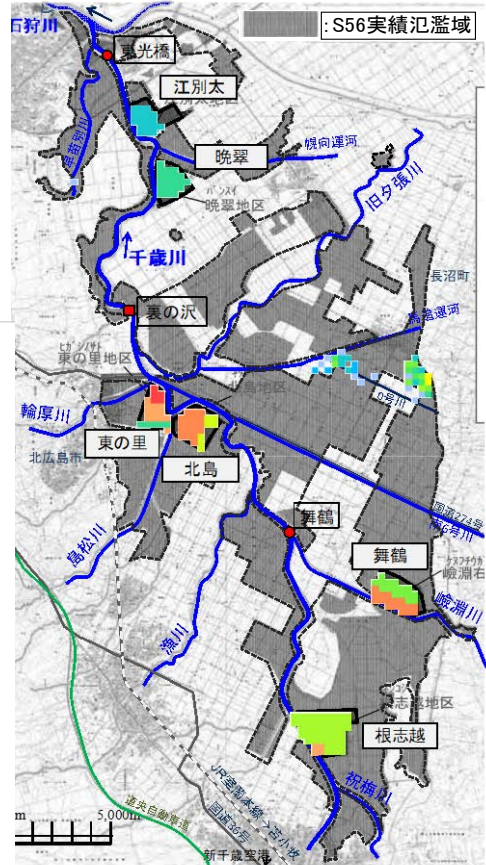
図 5.12(2) 浸水深の時系列変化

8/5 24:00



8/5 24:00 : 晩水，江別太の下流域の2遊水地で貯留開始

8/6 3:00



8/6 3:00 : 河道（裏の沢）の水位がピーク

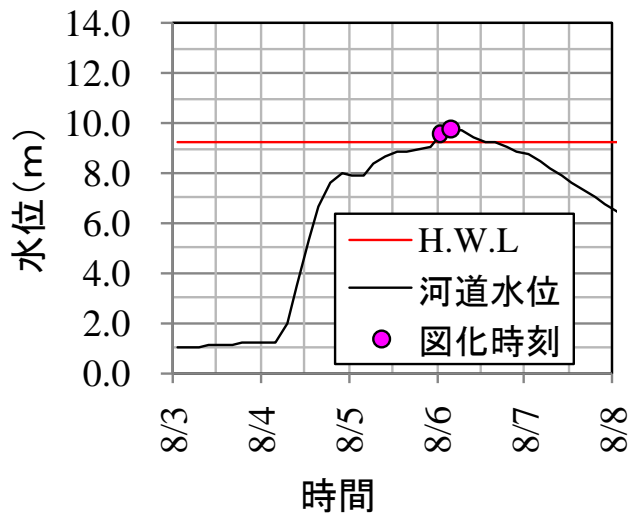
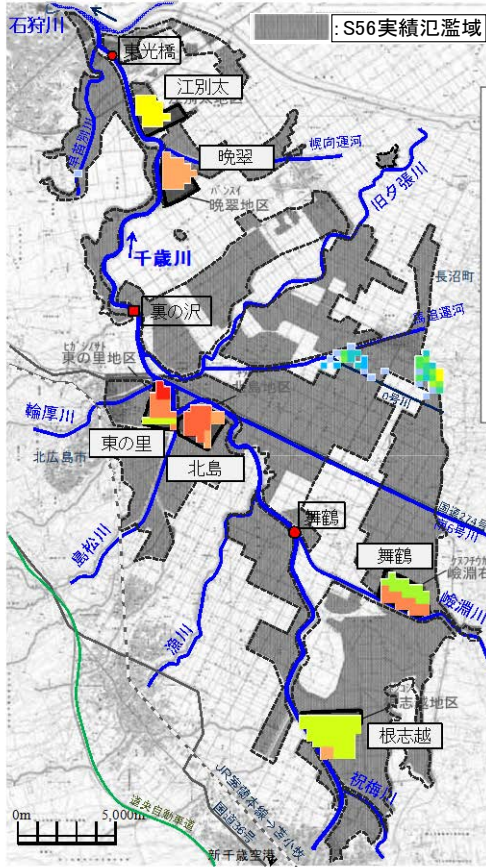


図 5.12(3) 浸水深の時系列変化

8/6 6:00



8/6 9:00

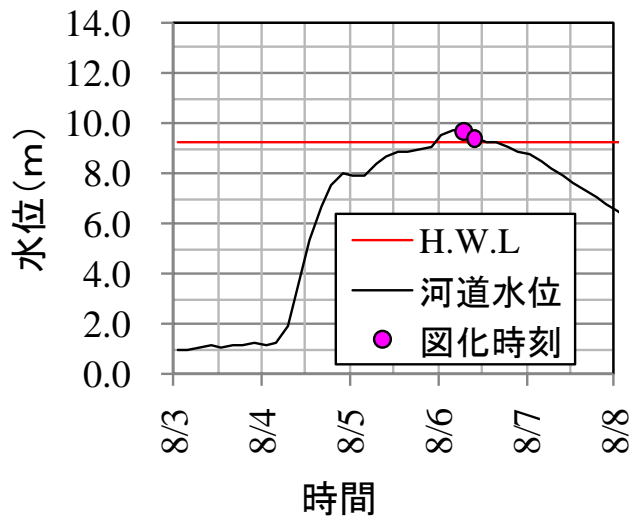
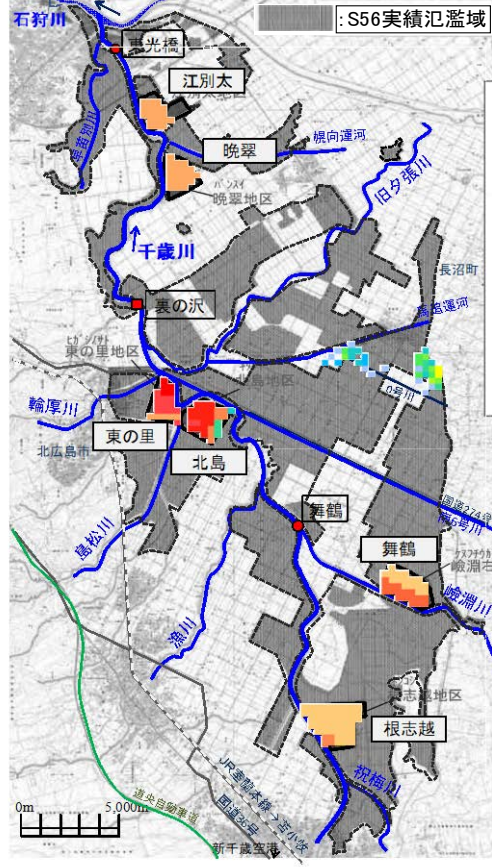
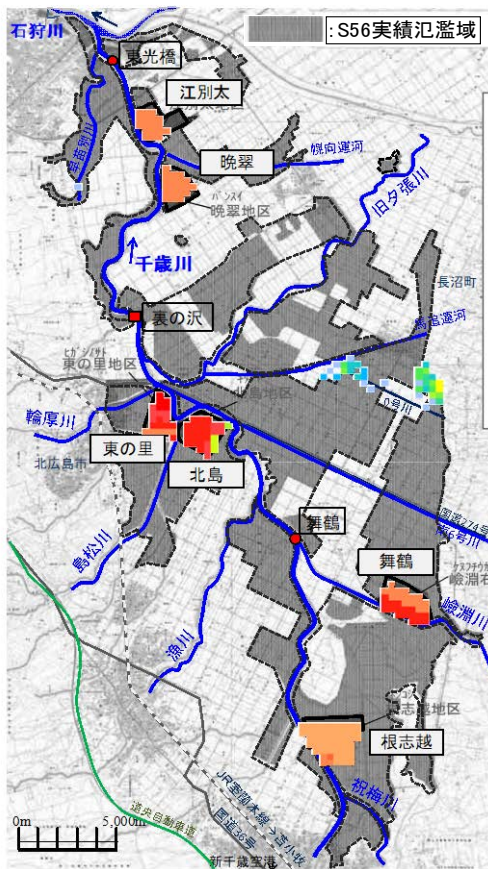
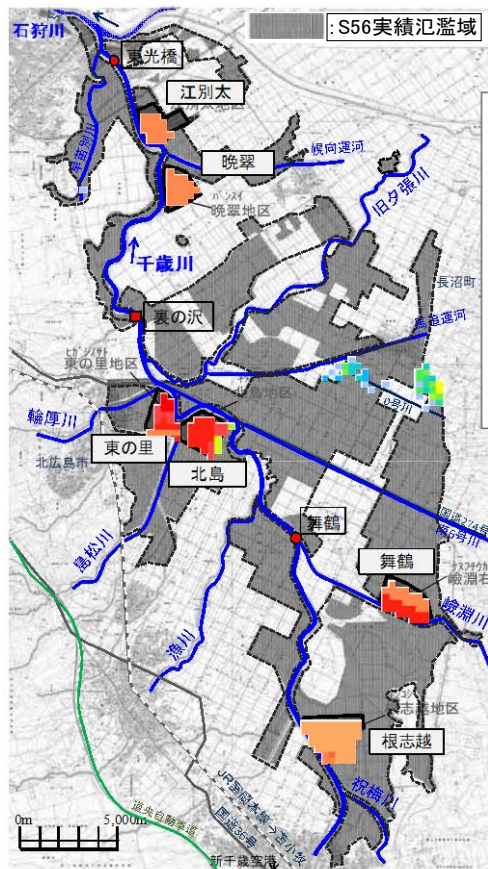


図 5.12(4) 浸水深の時系列変化

8/6 12:00



8/6 15:00



8/6 12:00 : 東の里, 北島の遊水地の貯留量が多い

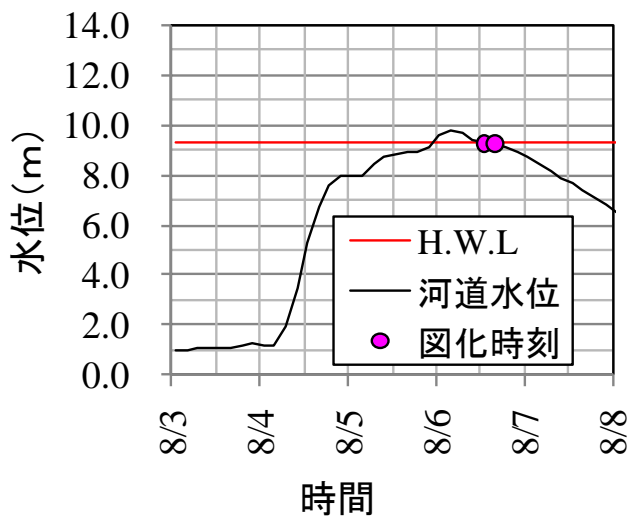
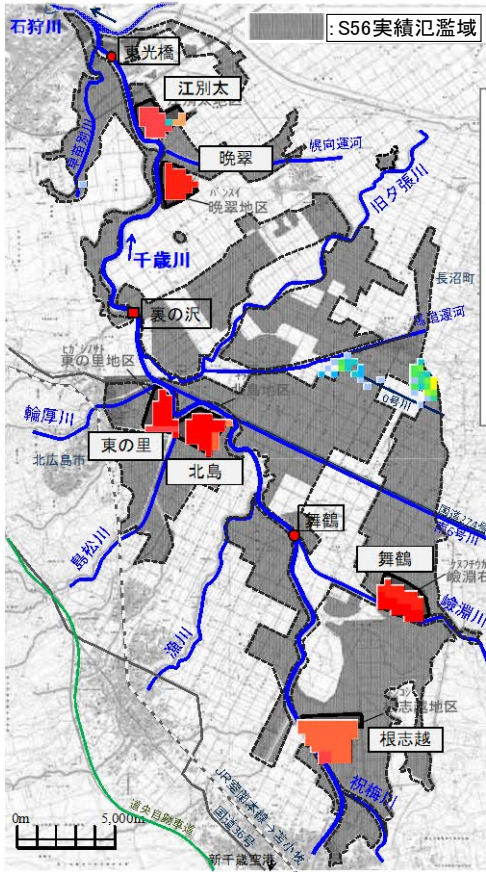
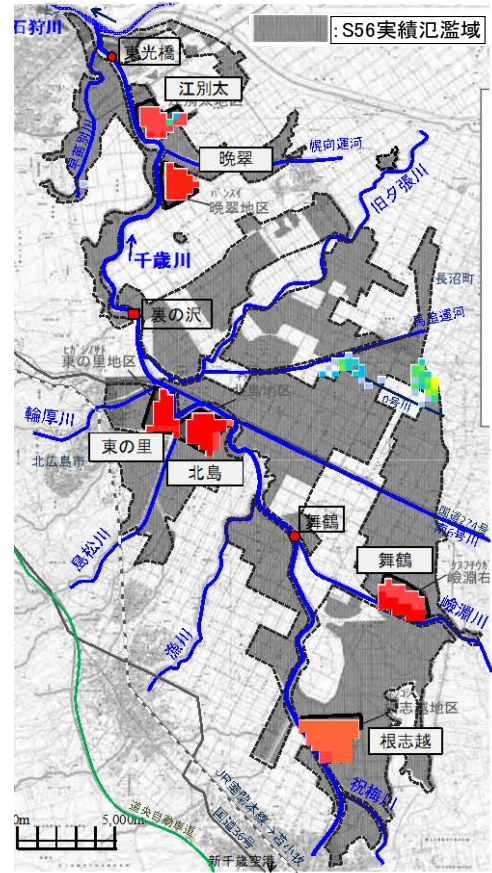


図 5.12(5) 浸水深の時系列変化

8/6 18:00



8/6 21:00



8/6 18:00 : 遊水地の貯留量がピーク (河道水位がピークをむかえてから15時間後)

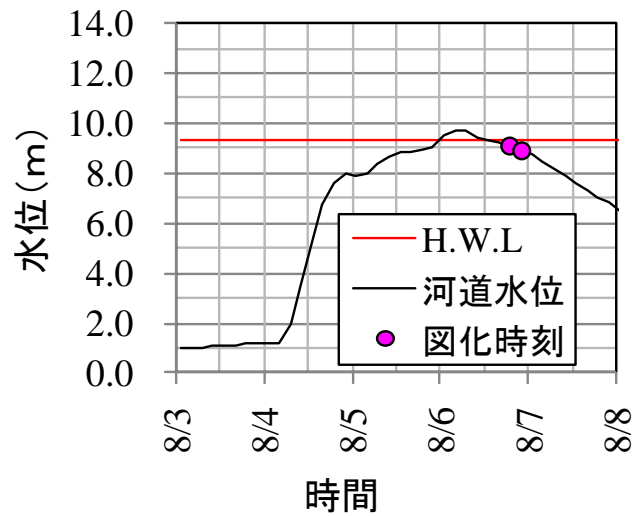
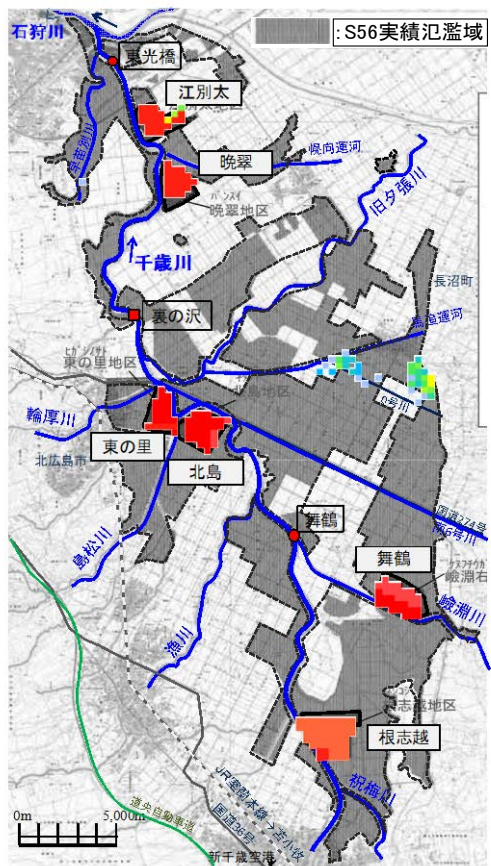


図 5.12(6) 浸水深の時系列変化

8/6 24:00



8/7 3:00

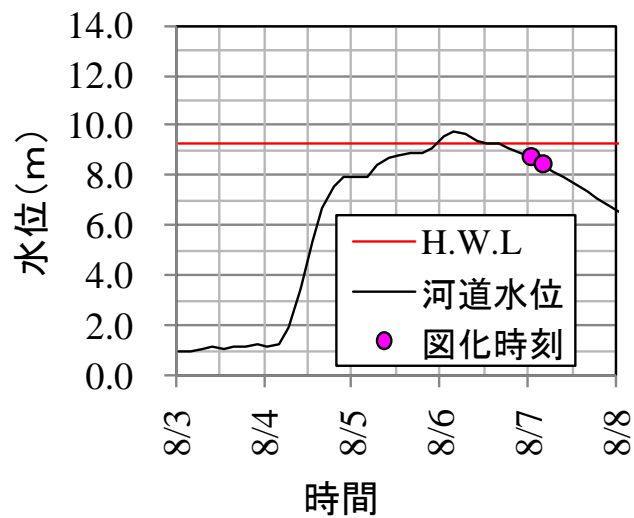
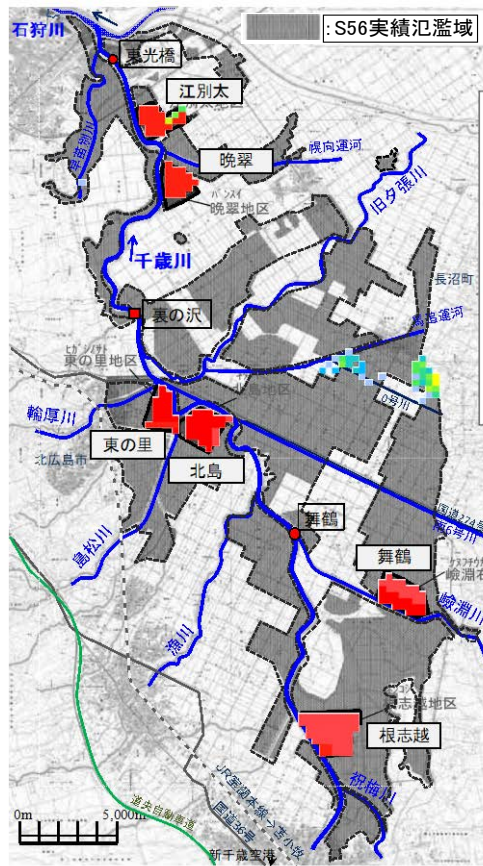
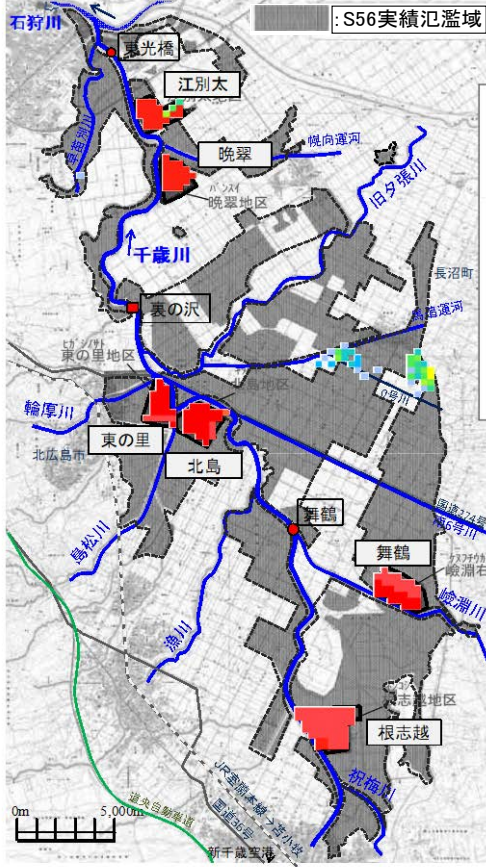


図 5.12(7) 浸水深の時系列変化

8/7 6:00



8/7 12:00

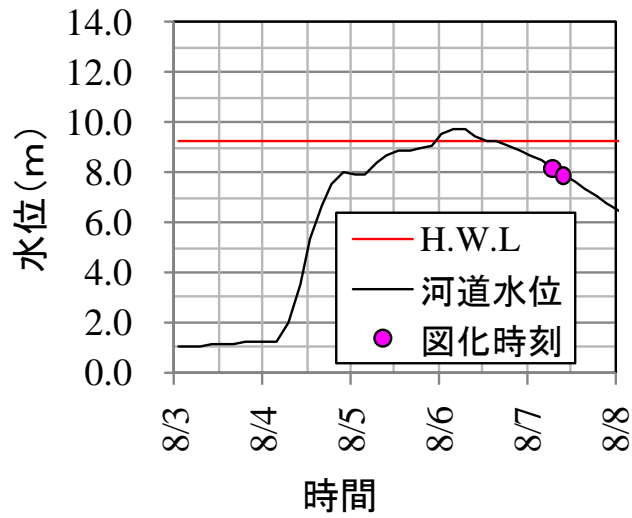
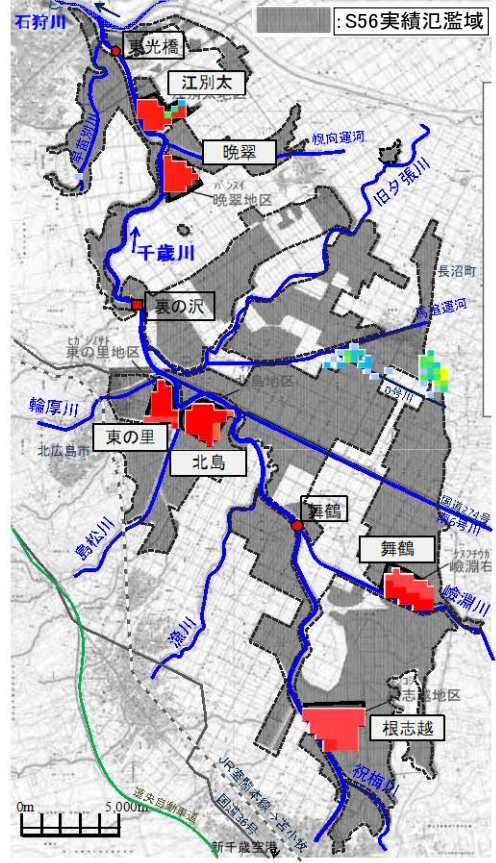


図 5.12(8) 浸水深の時系列変化

8/7 15:00

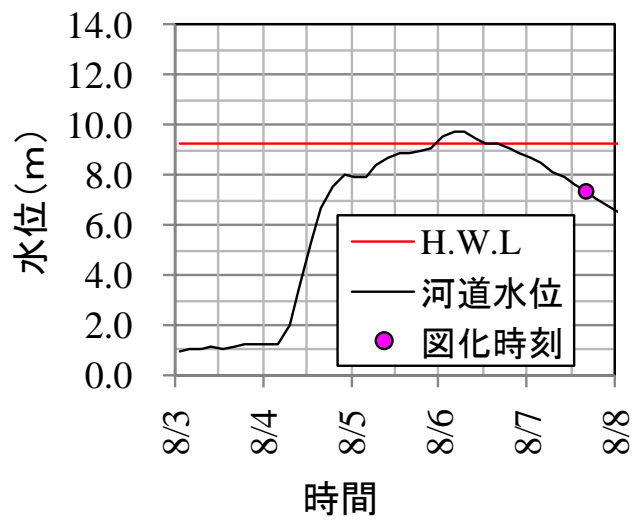
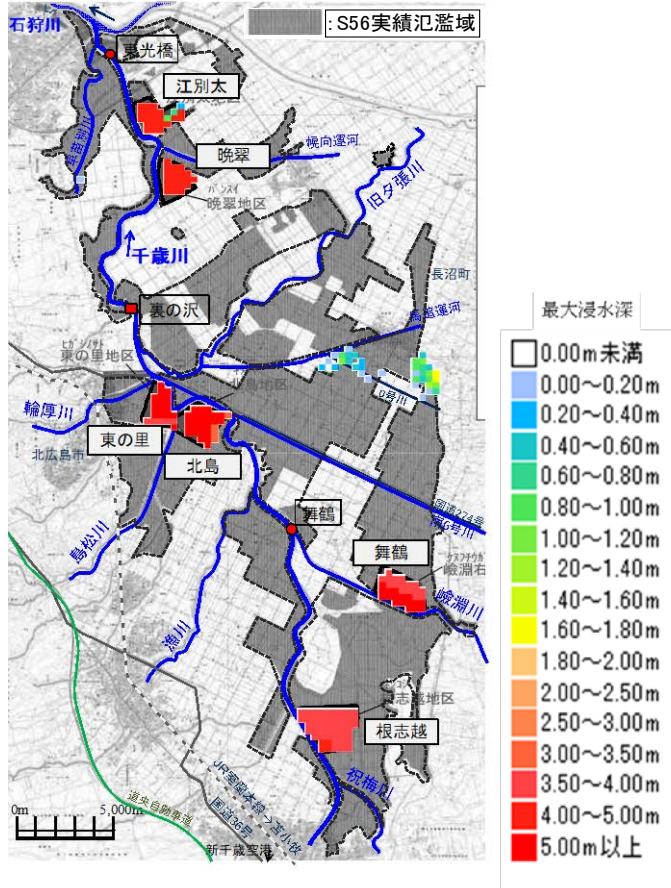


図 5.12(9) 浸水深の時系列変化

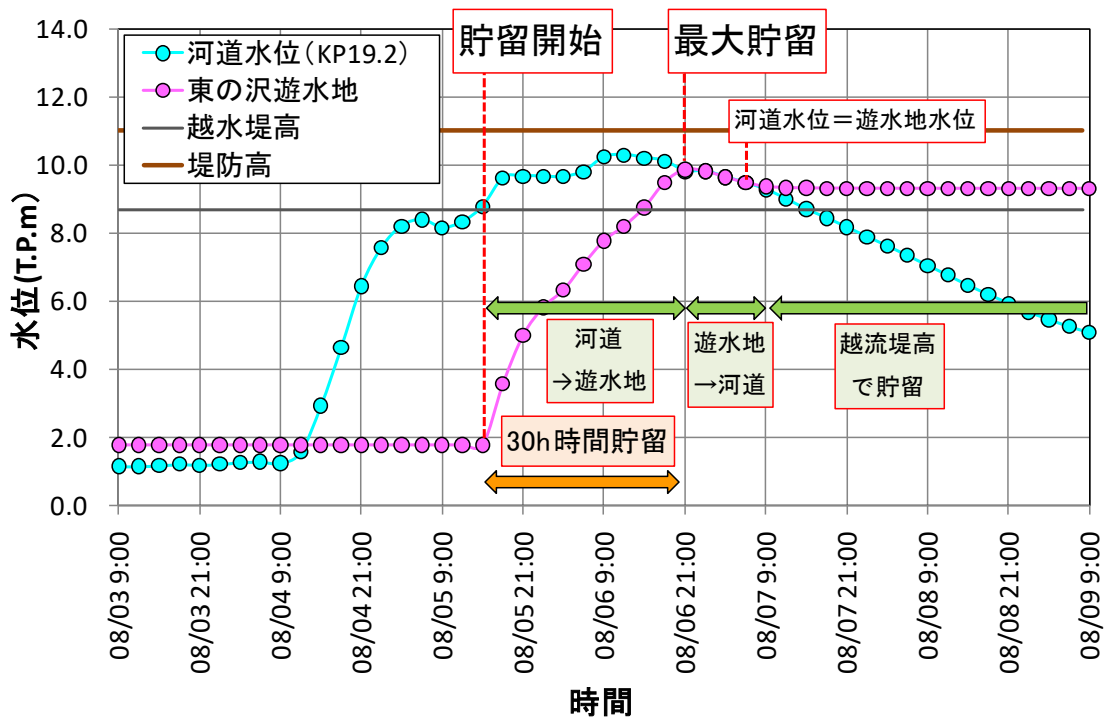


図 5.13 遊水地と河道水位の時系列変化 (東の沢遊水地)

(3) 遊水地貯留量

遊水地群の貯留量を図 5.14 および表 5.7 に示す。ここで、計画容量は計画高水位相当の容量である。計算貯留量の合計は、計画容量の合計に対して、約 2割増しの貯留である。これは、約 1.5m ある周囲堤の余裕高に対して約 0.5m 程度を使い貯留していることになる。

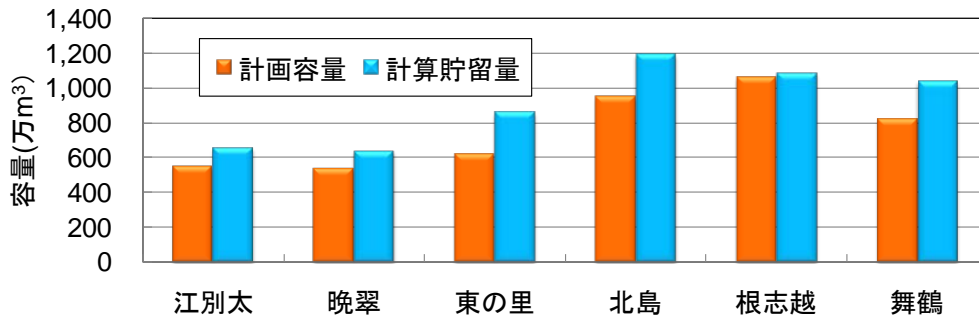


図 5.14 遊水地群の貯留量

表 5.7 遊水地群の貯留量

	江別太	晩翠	東の里	北島	根志越	舞鶴
計画容量(m3)	5,500,000	5,400,000	6,200,000	9,500,000	10,600,000	8,200,000
計算貯留量(m3)	6,529,000	6,364,000	8,587,000	11,902,000	10,840,000	10,375,000
貯留割合(%)	119	118	139	125	102	127

(4) 総合的な治水効果

遊水地および河道における治水機能の分担量の割合を図 5.15 に示す。その結果、遊水地群の容量が最大時間でみると、遊水地群が約 5 割、千歳川本川の河道負担が約 4 割、支川が約 1 割であった。

千歳川の昭和 56 年洪水を 1.2 倍した超過洪水の被害軽減方法は、①支川流量を排水機場により本川へ排水し支川水位を低減することと、②本川流量を遊水地群と河道で受け持つシステムが機能することが確認できた。ただし、本解析では計画高水位よりも高い水位が継続しても破堤はしない前提である。そのため、超過洪水に対して排水機場や遊水地群が機能するためには、破堤リスクを軽減するための堤防の強化や維持管理、さらにその都度の降雨状況に応じた施設運用や危機管理対応が可能なシステム構築が必要と考える。

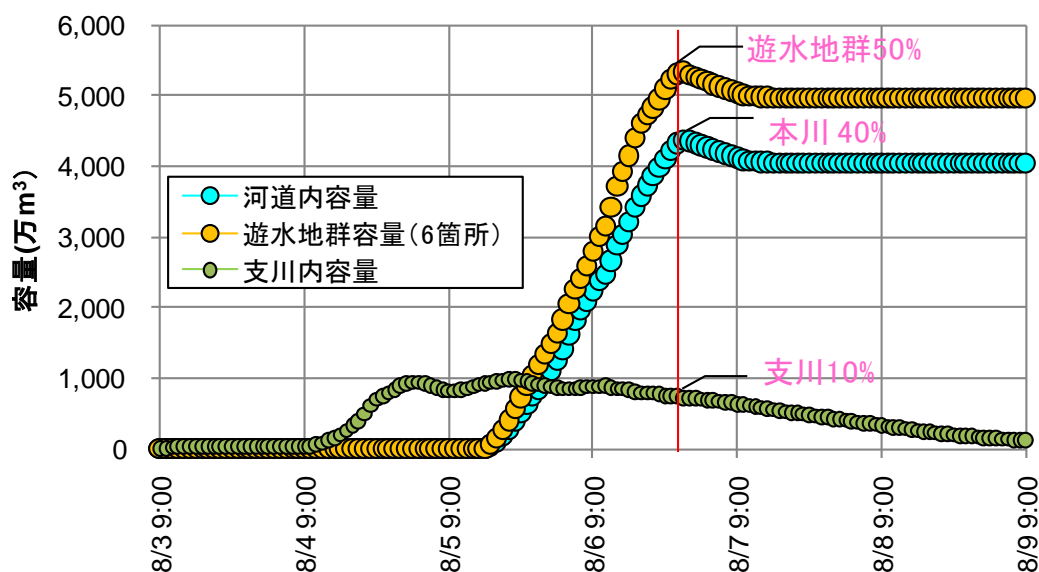


図 5.15 治水機能の分担割合

5.5 本章のまとめ

本解析で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 内水・外水を一体化した本解析により，気候変動の影響に伴う浸水範囲の拡大や，その場合の河道や遊水地等の治水施設の効果や分担割合を定量的に評価できるようなモデルが提案でき，それによって治水施設の総合的な評価ができた。
- (2) 本解析より，計画を上回る降雨に対して，排水機場は支川の越水被害を軽減し，遊水地群は拡散していた氾濫域を遊水地内に限定する効果が把握できた。
- (3) 本解析により，2016年北海道豪雨のようなこれまでに経験を上回る超過洪水に対してその都度の降雨状況に応じた施設運用や危機管理対応が必要であり，それらを予測できるモデルが開発できた。

5.6 参考文献

- 1) IPCC, Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Barros, V. R., et al. (eds), Cambridge University Press, 1132p, 2014.
- 2) (財)北海道河川防災センター・研究所：「実時間洪水予測システム理論」解説書，2004.
- 3) 北海道開発局 札幌開発建設部資料
- 4) 北海道開発局 HP：千歳川遊水地，
<www.hkd.mlit.go.jp/ky/ki/...att/splaat0000004epw.pdf>（アクセス日 2017/4/11）
- 5) 北海道開発局 HP：石狩川水系河川整備計画 千歳川河川整備計画[変更]，
<https://www.hkd.mlit.go.jp/sp/kasen_keikaku/kluhh4000000hbeq.html>（アクセス日 2017/6/11）
- 6) 北海道開発局 HP：千歳川河川事務所 漁川ダム管理支所
<https://www.hkd.mlit.go.jp/sp/titose_kasen/kluhh4000000f19x.html>（アクセス日 2017/6/11）

第 6 章 結論

本論文は、超過洪水に対し被害を軽減することを目的とした研究である。得られた成果を以下に整理する。

第 1 章では、我が国の地形、高齢化、インフラ投資の減少など厳しい状況のもと、気候変動による降雨の増加で、治水安全度が低下することを述べた。災害に強い安全な国土づくりに向け、効率的かつ効果的な対策を行っていくために、水害リスクの評価方法が必要であることを整理した。そして、水害リスクに対する適用策として、ハザードの予測や脆弱性を踏まえた予測手法が必要であることを述べた。

第 2 章では、近年豪雨が頻発化することで、洪水・土砂災害の発生頻度が増加していることを整理した。また、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の予測をから、日本では降雨が 1.2 倍程度大きくなる点を整理した。さらに、2016 年 8 月北海道豪雨を教訓として、広域かつ前例が無い規模の水害に対して、河川管理施設の操作・運用や、避難情報の提供が課題であると述べた。

第 3 章では、気象庁が配信する 2 種類の数値気象予報モデル（GSM, MSM）で計算された予測雨量について検証した。降雨予測は、予測雨量を積算することで精度が向上し適用性が高まることを確認した。また、局地豪雨に対しては、MSM が活用できる可能性があることが把握した。さらに、降雨予測は、全体的に少雨傾向に予測するため、倍率を見込む必要があるが、例えば台風の場合では、1.9 倍程度にする必要があることを把握した。

第 4 章では、石狩川水系千歳川流域を対象に、低平地河川を対象とした内水・外水を一体化した氾濫解析モデルを構築した。これまで、ダム、遊水池群、排水機場、樋門操作まで考慮したモデルの構築に至っていない中、それらを考慮する総合的なモデルを作成した。モデルの検証は、2 洪水について行い、河川水位、氾濫区域ともに精度の高いものであった。このモデル構築により、気候変動に伴う超過洪水に対してのダム、遊水池等の操作を含めた総合的な操作の提案や、避難・水防に対する予測支援ツールの基礎ができた。

第 5 章では、気候変動に伴う計画を上回る降雨に対して、治水施設の効果を総合的に把握した。具体的には、排水機場は支川の越水被害を軽減し、遊水地群は拡散していた氾濫域を遊水地内に限定する効果が把握できた。

また、超過洪水に対して排水機場や遊水地群が機能するためには、破堤リスクを軽減するための堤防の強化や維持管理、さらにその都度の降雨状況に応じた施設運用や危機管理対応が可能なシステム構築が必要と考え、本解析モデルは、今後も発生しうる超過洪水に対し、氾濫被害を軽減するための検討や、治水施設の効果の分析に役立つことを述べた。

以上より、本論文は、2016 年 8 月の北海道豪雨のような、これまで経験したことのない豪雨に対し、洪水被害を軽減する有効な方法を提示するものである。将来見込まれる気候変動や社会環境の変化に対して、新しい河川管理施設の操作・運用のあり方や、最適な避難方法を検討する上で、役立つことができると考える。

謝辞

博士後期課程の在学中，研究には厳しく，日頃はあたたかく接していただきました，室蘭工業大学大学院教授 中津川 誠先生に深甚なる謝意を表します。

室蘭工業大学大学院教授 木村克俊先生および准教授 有村幹治先生には，副査として，本論文の細部にまで貴重なご助言をいただきました．ここに謝意を表します。

北電総合設計株式会社においては，本研究の機会を与えてくださるとともに，寛容なご配慮をいただきました，坂本 容取締役会長，古谷 恵一取締役社長，能登谷 勇人取締役，後藤 泰孝技術研究所長に謹んで感謝の意を表します．また，前技術研究所長の中村 興一博士には，著者が北電総合設計株式会社に入社してから現在に至るまで，熱心にご指導をいただいた上，本研究をすすめるにあたり全面的にサポートをいただきました．改めて謝意を表します。

室蘭工業大学名誉教授 藤間 聡先生には，博士前期課程当時にご指導をいただき，著者が河川分野へ進むきっかけをいただき，また，室蘭工業大学名誉教授 近藤 一郎先生には，学部生当時にご指導をいただき，折にふれ，お二人からありがたいご助言をいただきました．ここに深く感謝致します。

著者が本論文を執筆するにあたり，貴重なデータを快く提供していただきました，北海道開発局 札幌河川事務所 河川管理課様，株式会社ドーコン 河川部様に，この場を借りて御礼を申し上げます。

また，仕事と研究の両立は，自分が考えていた以上に難しく力不足を痛感する日々でしたが，そのような中，仕事について協力やサポートをいただきました土木部 前室長 樋詰 透様，技師長 福本 哲夫様，技師長 伊藤 英浩様，技術研究所 室長 齋藤 敏樹様，技師 加藤 晃司様，川久保 由香様，北電総合設計株式会社の社員一同に感謝を致します。

最後に，本研究を遂行した3年間，多くのことが蘇りますが，一生懸命に支えてくれた妻に，感謝の気持ちでいっぱいです。両親，家族，友人に改めて謝意を表し，本論文の謝辞といたします。