

博士論文

ALOS-2 搭載 L バンド合成開口レーダによる
洪水域抽出に関する研究

大木 真人

要旨

洪水は世界中で最も多発している災害であり、気候変動による豪雨の増加や経済発展による都市化の進行などにより今後もその被害は増大する見込みである。その減災に資するために、遠隔的に災害状況を把握できる衛星リモートセンシングは必要不可欠である。特に日本国内の洪水は時空間スケールが小さいため、高い空間分解能と高い頻度による迅速な洪水域の把握が必要であり、昼夜や天候に影響されずに地表の高分解能画像を取得できる合成開口レーダ (SAR) の利用が有望である。これまでの国内での洪水状況把握は航空機観測や現地調査によるものが中心であり、観測や調査にかかる準備、洪水域の算出などに時間を要するほか、夜間や悪天候時は観測や調査がそもそも困難であった。SAR を搭載した地球観測衛星は国内外に多数あるが、X ないし C バンドの周波数帯を用いたものが多く、それらの周波数帯では技術的な制約などから特定の被災地を 1 日 1 回以上の高頻度で観測することは単一の衛星では難しく、また観測幅が高分解能モードでは数十 km 以下になるなど観測範囲も狭いことが、国内の洪水域把握で実用に至らない要因であった。宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が開発・運用する陸域観測技術衛星 2 号 (ALOS-2) は、高分解能かつ広域の観測を特長とする L バンド SAR 「PALSAR-2」を搭載し、緊急時には観測方向の機動的な変更により特定の被災箇所を 1 日 1 回以上観測する高頻度観測が可能である。そこで本研究では、ALOS-2 を用いた高分解能、広域、高頻度、迅速、かつ高精度な洪水域把握手法を検討した。

これらの目的を実現するためには、洪水域における ALOS-2 の L バンド SAR データの特性について多面的に理解する必要がある、次に述べるようないくつかの研究を行った。まず、既往研究よりも幅広い入射角のデータを棄却せず用いることにより、ALOS-2 の高頻度観測データを有効に活用し、1 日 1 回以上の頻度で洪水域を迅速かつ高頻度に把握できることを示した (第 3 章)。次に、通常の SAR 強度画像では抽出が困難である、建物などの構造物が水面上に存在する場合の洪水域について、干渉解析 (インターフェロメトリ、InSAR) によって抽出できることを示し、特に干渉位相に着目した空間統計量が有効であることを示した (第 4 章)。これらの知見を統合したうえで、さらに Today's Earth (TE) で提供されている洪水シミュレーションデータを ALOS-2 データと組み合わせることで高速化、高精度化、自動化を図った洪水域抽出アルゴリズムを開発し、その抽出精度や運用性を評価した (第 5 章)。以下にこれら各章の要旨を述べる。

第 3 章では、建物域を除く洪水域 (完全に冠水するもの) について、ALOS-2 の強度画像を用いた高頻度な洪水域把握を試行した。周回衛星の特性上、衛星の飛行経路と被災地との幾何的な位置関係は日々変化するため、高頻度で洪水抽出を行うには日々異なる様々な入射角で観測を行う必要がある。既往研究では、入射角などの観測条件が特に良好な一部のデ

ータのみが使用され、幅広い観測条件のデータでの洪水域抽出の可否やその精度、最適な閾値が網羅的に検証されておらず、ALOS-2 の高頻度性観測データが活かされていなかった。そこで本研究では、平成 27 年関東・東北豪雨観測の ALOS-2 高頻度観測をテストケースとして、観測条件が理想的でないデータも含む全ての SAR 強度画像を用いた網羅的な検証を初めて行った。その結果、ALOS-2 では適切な閾値を用いれば 10–50 度程度の範囲のオフナディア角で洪水抽出が可能であり、これにより ALOS-2 単独でも 1 日 1 回以上の頻度で許容範囲内の誤差で洪水域の把握が可能であることが示された。また日毎の時系列的な洪水域抽出結果が得られたことから、その応用として、洪水面積の変化を予測したり、浸水継続日数を算定したりできる可能性も示唆された。

第 4 章では、建物域の洪水について、干渉解析を用いた抽出を試みた。建物域の床上・床下浸水（建物が完全に水没はしない状態）は、水面上に残る構造物からのレーダ反射が強く、またその強度は建物の向きに強く依存するため、強度画像による抽出は難しかった。実際に 2011 年のタイ王国の洪水では、航空機搭載 L バンド SAR による観測で、工業地帯や住宅密集地における洪水域が抽出できないことが問題となった。そこで本研究では、建物浸水については強度画像よりもレーダ波の位相情報を用いた干渉解析画像が有効であることをシミュレーションおよび実際の ALOS-2 データ解析によって確認した。また、干渉解析では従来、災害抽出のためにコヒーレンスと呼ばれる指標がよく使われてきたが、これは個々の建物が分散した（ポイントターゲットと見なせる）場合においては災害による変化を過小評価する傾向があり、代わりに干渉位相の標準偏差など、位相のみに注目した空間統計量を用いることが有効であることを初めて示した。

第 5 章では、完全冠水（非建物）洪水（第 3 章）と建物浸水（第 4 章）の知見を統合し、両方のタイプの洪水域を抽出可能な、実用的な自動処理アルゴリズムを開発した。このアルゴリズムにおいては、東京大学と JAXA が共同で開発し運用する Today's Earth (TE) システムで提供されている、気象・河川モデルに基づく準リアルタイム洪水シミュレーションデータを初めて SAR の解析と組み合わせて使用し、高速化、高精度化を図った。また、既往研究の自動処理手法は、様々な災害や観測条件に対する汎用性がないことが課題であったことから、本研究では過去の 7 つの水害事例の延べ 15 の ALOS-2 観測データを用いて精度を検証した。その結果、本アルゴリズムの洪水域抽出精度は、オフナディア角に左右されるが、最悪値で 6 割、最高値で 9 割、平均的には 7 割程度であった。SAR に期待される役割は、天候や時間帯に依存しやすい航空機観測や現地調査などの手段を待たずに最も早く速報を提供することであり、上記の精度は速報としては十分なものである。計算時間は 1 シーン（約 50km 四方）30 分以下と高速であった。また、抽出した洪水域と標高データを組み合わせることにより、浸水深も 1m 程度の精度で推定できる可能性が示された。

第 6 章では、本研究全体の成果と今後の展望を議論した。本研究の成果を用いると、ALOS-

2 を用いて洪水域を高空間分解能、広域、高頻度、かつ迅速に把握できるようになる。空間分解能は、都市域で家屋レベルの洪水域把握が可能な約 10m(解析後の分解能であり、ALOS-2 原初データは 3m)、一回の観測領域は比較的広域の洪水にも対応可能な東西方向 50km、南北方向は数百 km 以上 (ALOS-2 の仕様によるもの) である。洪水域が把握可能な頻度は 1 日 1 回以上であり、日本国内で多い時間スケールの短い洪水を逃さず捉えることができ、洪水が長時間続く場合にはその日々の変化も把握できる頻度である。迅速性については、本アルゴリズムの処理は 30 分程度以内、ALOS-2 の地上処理システムで行われる前段の標準処理を含めても 2 時間程度以内であり、例えば深夜 0 時頃に行われる ALOS-2 の夜間の観測結果が翌朝の災害対応の初動に使用できる。得られた洪水域抽出結果は、避難誘導、人命救助、排水作業、インフラ等の被害把握と復旧、災害後の復興計画など、初動から復興フェーズまで、災害対応の様々な活動を迅速化、最適化できる可能性がある。

現状の本研究の解析手法は、処理の高速化・単純化のために限られた数の変数 (災害前後の SAR 強度画像、コヒーレンス差など) を用いて、閾値処理やベイズ推定などの比較的単純な手法で洪水抽出を行っている。計算時間とのトレードオフとはなるが、さらなる精度向上のために機械学習などのより複雑なモデルを用いた洪水域推定も今後取り組む価値がある。本研究は、解析対象としては日本国内の災害を扱い、観測手段としては日本の災害を高頻度で観測できる ALOS-2 を用いた。しかしながら、本研究の手法は閾値などのパラメータの変更により、他の衛星 SAR や他の地域の洪水にも対応できる拡張性を考慮している。将来的には、ALOS-2 の後継機である ALOS-4 や、国内外の他の SAR 衛星の複合利用によりさらなる高頻度化、高精度化が見込まれる。国外の災害にも適用できれば、世界的に増加する水害に対してその減災に貢献できる。また、本研究の成果の実用化への取り組みとして、観測後速やかに自動処理と情報提供を行う ALOS-2 の実運用システム内に、本研究のアルゴリズムを実装していくことが望まれる。

目次

第 1 章	序論	1
1.1.	研究の背景	1
1.2.	SAR の原理と ALOS-2 の特長	4
1.3.	過去の研究	10
1.4.	本研究の目的.....	17
1.5.	本研究の新規性.....	20
第 2 章	水害事例と使用データ	23
2.1.	本論文で扱う水害事例.....	23
2.2.	使用した ALOS-2 データ	25
2.3.	精度検証用の参照データ	27
2.4.	精度の検証方法.....	28
第 3 章	強度画像による非建物域（完全冠水）の洪水推定	30
	本章の要旨	30
3.1.	データと解析手法.....	31
3.2.	結果	36
3.3.	考察	44
3.4.	本章の結論	50
第 4 章	干渉処理画像による建物域の洪水推定	52
	本章の要旨	52
4.1.	干渉 SAR データの解析手法.....	53
4.2.	建物洪水における干渉 SAR のシミュレーション	57
4.3.	ALOS-2 実データの干渉 SAR 解析	60
4.4.	考察：シミュレーションと実データ解析結果に基づく干渉 SAR の有効性	67
4.5.	本章の結論	69
第 5 章	洪水シミュレーション等を併用した自動洪水推定	71
	本章の要旨	71
5.1.	使用するデータ.....	72
5.2.	解析アルゴリズム.....	78
5.3.	結果	88
5.4.	考察	96
5.5.	本アルゴリズムの応用.....	100
5.6.	本章の結論	107

第 6 章	総括と今後の展望.....	110
6.1.	これまでの課題と本研究が目指した目標（第 1 章－第 2 章）	110
6.2.	強度画像による完全冠水（非建物）洪水抽出の総括（第 3 章）	110
6.3.	干渉処理画像による建物域の洪水抽出の総括（第 4 章）	111
6.4.	洪水シミュレーション等を併用した自動洪水推定の総括（第 5 章）	112
6.5.	今後の展望	112
付章	.....	114
付章 A	.....	114
付章 B	.....	119
本研究に関連する発表リスト	.....	121
1.	査読付き論文	121
2.	審査のある国際学会発表.....	122
3.	その他の学会・研究会発表、査読無し論文.....	122
参考文献	.....	125
謝辞	.....	133

第1章 序論

1.1. 研究の背景

1.1.1. 洪水モニタリングの重要性

洪水は、世界の種々の災害の中でも最も高い頻度で発生し、多くの被害を引き起こしている。国連防災機関（UNDRR）および災害疫学研究センター（CRED）の統計によれば、1995年から2015年までの20年間において洪水は世界の自然災害の発生件数の43%を占め、延べ20億人を超える被災者と約16万人の死者、約6600億ドルの経済損失を生じている[1]。また、これらの被害の多くをアジア地域が占めており、国際社会からの支援が課題となっている[2]。さらに、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の報告によれば、気候変動により、極端な降水の発生頻度が今後増加すると予測されており[3]、現状でも大きい洪水のリスクは将来さらに増大すると考えられる。また、洪水は人間社会に損失を与える災害だけではなく、世界各地の乾燥地などでは季節的な洪水によって河川や湖周辺の生態系を維持する役割を持っている場合もある。

日本では、急峻な地形のために河川が急勾配であり、豪雨により河川流量が急激に増加し短時間で氾濫が発生するという地理的特性がある。また、河川水位より低い沖積平野の土地利用が盛んであり、日本の人口の41%、国民資産の65%が洪水の可能性のあるエリアに集中している[4]。近世以降の治水によって洪水に対する安全性と水資源の利便性は高まり、これは日本の経済成長を後押しした要因の一つでもある。しかし、その経済成長による急激な都市化と資産価値の増加は水害の被害額をかえって高める結果となっている。実際に国土交通省の試算によれば平成30年7月豪雨（2018年）の被害額は1兆2150億円、令和元年東日本台風（2019年）の被害額は1兆8600億円であり、いずれも昭和36年の統計開始以来最大の記録を続けて更新している[5]。

人類社会の持続的な発展のためには、国際社会の連携のもと、多様な観測手段を用いてこのような気候変動、自然災害、生態系の動態をモニタリングし、防災・減災に活用する必要がある。このような背景から、2005年に地球観測に関する政府間会合（GEO）が発足し、全球地球観測システム（GEOSS）の整備を推進してきた。GEOSSは各国の多様な地球観測

システムを連携して包括的なシステムと見なし、災害レジリエンスや水資源管理など 8 つの喫緊の社会課題に取り組み、ひいてはパリ協定等の気候変動への対策や持続可能な開発目標（SDGs）へ貢献しようとするものである[6]。具体的な観測手段としては、地上観測のほか、衛星によるリモートセンシングが主要な役割を担っている。

日本国内の政策としては、洪水リスクの増大を受けて近年、堤防などの施設整備による洪水の防止（ハードによる対策）のみならず、施設整備では防ぎきれない大災害が必ず発生するとの前提に立った情報共有、避難計画、ハザードマップ作成などの減災対策（ソフトによる対策）を強化する方針が示された（例えば 2015 年施行の「水防法等の一部を改正する法律」）。減災の具体策の 1 つとして、迅速に被災状況を取得し、それに基づいた救急救助活動、設備の応急的な復旧などの初動を行うために、「人工衛星等の活用によるリアルタイム浸水把握の技術開発を行う」（社会資本整備審議会答申「気候変動を踏まえた水災害対策のあり方について」より）方針も示された[7]。内閣府の主導する課題解決型の研究開発プロジェクト「戦略的イノベーションプログラム（SIP）」の研究課題の 1 つ「レジリエントな防災・減災機能の強化」（2014 年度～）では、洪水の予測から、衛星観測運用、衛星観測データの解析、情報提供、災害対策での利活用まで一貫した効率化・最適化を目指しており、観測からデータの解析結果の取得までに要する時間を 2 時間程度に短縮することを目指している。衛星開発・運用機関である宇宙航空研究開発機構（JAXA）と、ユーザである国土交通省が共催し、水害時の効果的な衛星の利用を議論する「水害ワーキンググループ」では、衛星により他の手段よりも早く被災情報の第一報が出せれば、精度が 6 割程度の情報でも使える可能性があることなどが議論されている。

このように、洪水は現状でも被害が大きく今後も増え続ける見込みであり、その防災・減災に資するために衛星によるリモートセンシングを用いた取り組みが活発となってきている。主に日本国内の水害対策の観点からリモートセンシングによる洪水状況の把握へのニーズをまとめると次のようになる。

- 家屋レベルのスケールで浸水状況が把握できる高い空間解像度であること（10 m 程度以下）
 - 迅速であること（観測後 2 時間程度以内、特に夜 0 時頃の観測結果が翌朝の初動の準備に活かせること）
 - ある程度の精度（他のいかなる手段よりも早い速報なら 6 割でも許容）であること
 - 日本の時間スケールの短い洪水の浸水域およびその変化を捉えられるよう、高頻度（1 日 1 回程度以上）であること
 - 水害の全体を捉える広域のデータ（数十～数百 km）であること
 - 浸水域を示す分かりやすいデータであること（浸水深、浸水持続時間もわかるとよい）
- 本研究ではこれらのユーザニーズに応えることのできる洪水域のモニタリング手法の開

発を目指す。ここでいう洪水域のモニタリングとは、上記の精度や頻度が達成できること、上記の迅速性を達成するために処理を自動で行えること、結果を即時公開し利用できるようにすることを要件とする（本研究では結果の公開は将来課題とする）。

1.1.2. リモートセンシングによる洪水モニタリング

電磁波を用いて遠隔的に画像等の情報を収集できるリモートセンシング技術、特に衛星によるリモートセンシングは、全世界をカバーでき、安全で、安価（衛星そのものは高価であるが、インフラとして整備済みであれば個別の災害対応に対するコストは小さい）な情報収集手段である。しかし災害対応に実用的に用いるにはその迅速性、情報の頻度、精度、および技術の普及（先進国と途上国との情報格差、技術格差）の点で改善の余地がある[8]。災害時の衛星データの共有、解析、および人材育成を行う国際的な枠組みとしては、各国の防災機関や宇宙機関が加盟する「国際災害チャータ」がある[9]。日本では、災害時にチャータを発動する防災当局として内閣府、チャータ発動時に衛星データを取得する衛星運用機関として JAXA が加盟し、データ解析等で大学や研究機関が協力している。日本の災害発生時には各国からデータが無償提供され、2011 年の東日本大震災による津波被害、平成 30 年（2018 年）7 月豪雨、令和元年（2019 年）東日本台風などで発動されている。日本は他にアジア太平洋地域の災害を対象とした枠組みである「センチネル・アジア」を主導しており、例として 2011 年のタイ王国の洪水でデータの提供を行っている[10]。欧州の基幹的な地球観測プログラム Copernicus や、米国地質調査所（USGS）、中国国家防災委員会（NDRCC）など各国の機関もそれぞれ自国や国外の災害データの収集、解析、提供を行う体制を備えている。

リモートセンシング装置は、大別すると、太陽光の反射や地球からの放射光を観測する受動型と、自ら電磁波を発する能動型のセンサがある。受動型のセンサとしては、光学センサ（光学カメラ）が洪水マッピング、災害状況把握、土地被覆・土地利用把握などに広く用いられているが、晴れた日中でないと地表の良好な画像を取得できない[11]。洪水は悪天候に起因する災害であり、天候により観測の時間分解能が低下することは問題である。特に空間分解能の高い衛星ほど時間分解能は低い傾向にあり、日本の典型的な洪水のように時空間スケールがともに小さい洪水をモニタリングすることが困難である。

迅速かつ高解像度で地表の画像を取得できる点で優れているのは、悪天候時や夜間でも地表の状況を可視化できる能動型センサである合成開口レーダ（synthetic aperture radar、SAR）である。特に衛星に搭載した SAR は他の手段では得られない広域の画像を一度に取得できる。SAR を航空機に搭載することも可能だが、衛星より地表に近いことから観測幅が狭く、

広域の災害を効率的に網羅することができない[12]。SAR の洪水モニタリングへの有効性は 1970 年代には十分認識されていたが[13][14]、当時は米航空宇宙局 (NASA) が、SAR を搭載した初の地球観測衛星 SEASAT の約 3 か月間の運用に成功したばかりであり (1978 年)、定常的に広域の SAR 観測が行える体制はなかった。1990 年代以降からは、日本の JERS-1 (ふよう 1 号)、欧州の ERS-1/2、ENVISAT、カナダの RADARSAT-1 など定常的に運用可能な SAR 衛星が打ち上げられ、インターネットなど情報技術の普及も相まって SAR による洪水モニタリングとその災害対策への利用が現実的なものとなった[15]。2000 年以降は世界で官民の様々な SAR 衛星が登場し、陸域生態系 (森林等)、地殻 (地震・火山等)、雪氷、海洋、水文などの地球科学の各分野や、土木、都市環境、農業等の社会インフラのモニタリングなどに幅広く利用されている[16]。

1.2. SAR の原理と ALOS-2 の特長

日本では宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が災害監視、地球環境監視、資源探査などの目的で JERS-1 (1992-1998 年)、ALOS (だいち、2006-2011 年)、ALOS-2 (だいち 2 号、2014 年-) の 3 世代に渡って SAR を衛星に搭載し、運用してきた。最新の ALOS-2 は、それまでの衛星と比較して高い空間分解能、広い観測可能範囲、高い干渉性、他の衛星と異なる観測時刻などの特徴を持ち[17]、前述の洪水把握のニーズに応えることができるものと考えられる。これらの ALOS-2 の特徴について、SAR の基本原理とともに下記に詳述する。

合成開口レーダ (SAR) は自身が電波をターゲット (ここでは地上) へ照射し、ターゲットで散乱された信号を受信することでターゲットを画像化する能動型センサである。対照的に、光学センサは受動型センサであり、自身では電磁波を発さず、太陽光の反射光や放射光等を受光して画像を取得する。SAR は太陽光を使用しないため昼夜を問わず地表を撮像可能であり、大気圏に対してほぼ透過な波長帯を使用するため雲や多少の雨などにもほとんど影響されず地表を観測可能である。

図 1-1 に SAR 観測のジオメトリ (位置関係) の模式図を示す。合成開口レーダが地表の二次元的な画像を取得できるのは、レンジ方向 (電波照射方向) に対しては時間差で弁別可能であること、アジマス方向 (衛星進行方向と平行) に対しては衛星が進行しながら繰り返

レンジ方向を観測していることによる¹。この原理から、電波の往復時間にほとんど差が生じない衛星直下付近は結像できず観測不可能である。また、図においてオフナディア角と入射角は地球が平面であれば等しくなるが、実際には地球が曲面であるため常にオフナディア角<入射角となる。両者の差は衛星の高度によって異なるが、図 1-2 に示すように ALOS、ALOS-2 の場合はオフナディア角 40° において約 5° の差、60° においては約 10° の差があり、両者の定義の混同には注意を要する。本論文では、観測パラメータなどセンサ側の設定値としてはオフナディア角、地表の電波散乱特性など地表における現象の物理的過程について述べる際は入射角を主に使用する。

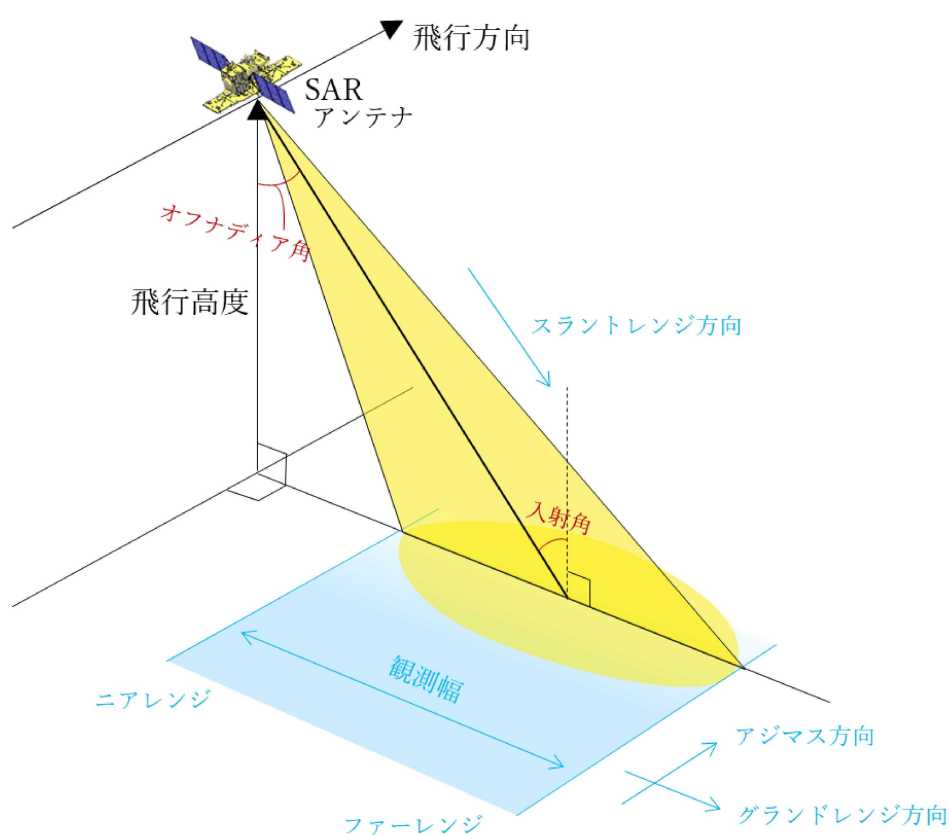


図 1-1 SAR 観測のジオメトリ。

¹ 正確には、レンジ方向には送信するパルスの長さ、アジマス方向には送信するビームの細さの限界から、得られた生データはそのままでは分解能が極めて低く（数 km-数十 km）、焦点の合わないノイズ様のデータとなる。その生データに対し、レンジ方向にはチャープ信号を用いたパルス圧縮処理を、アジマス方向には合成開口処理をそれぞれ行うことにより、高分解能の画像が得られる[18]。本論文ではこの処理があらかじめなされた標準処理データを使用するため、この処理の詳細については省略する。

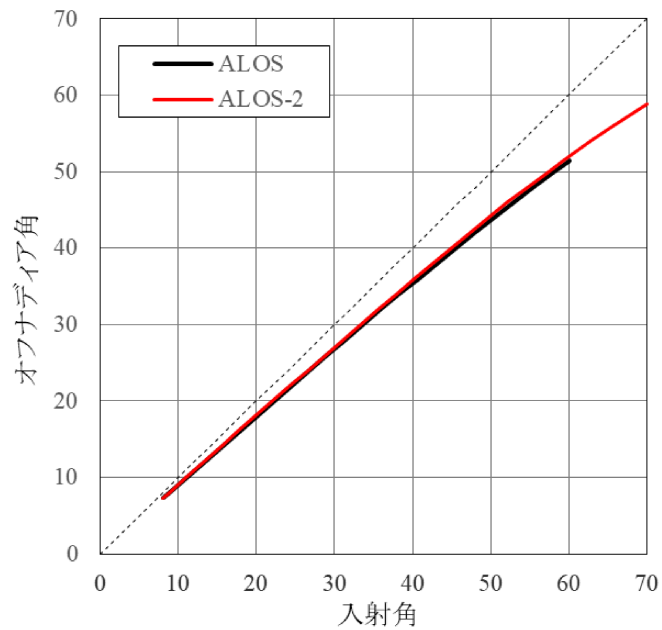


図 1-2 ALOS および ALOS-2 の場合のオフナディア角と入射角の関係。ALOS は高分解能モードの観測可能範囲（入射角 8–60°）、ALOS-2 は高分解能 3m モード（UBS）での観測可能範囲（入射角 8–70°）をプロット。

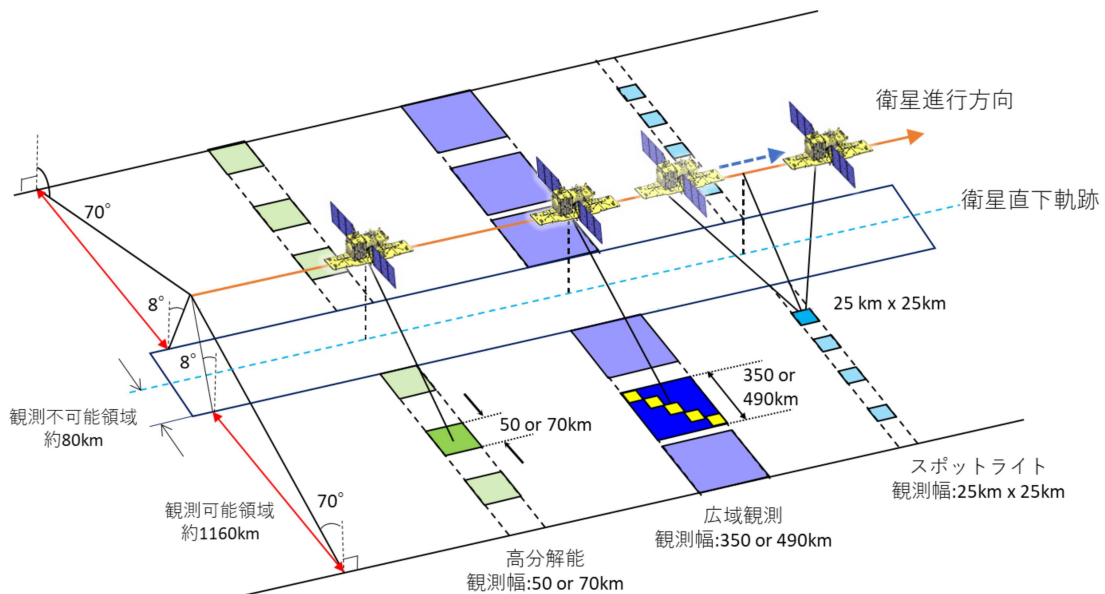


図 1-3 ALOS-2 PALSAR-2 の各観測モードとジオメトリ。JAXA 地球観測研究センター Web サイト [19] より引用。

図 1-3 に ALOS-2 搭載 SAR (PALSAR-2) の各観測モードとその観測ジオメトリの模式図を示す。高分解能モードは衛星軌道に平行に帯状の長尺の観測が可能な Stripmap 方式の観測モードであり、本研究では特に 3m の空間分解能と 50km の観測幅を有する「高分解能 3m

モード」のデータを主に用いる。広域観測モードは、空間解像度は低いが観測幅を大幅に拡大する ScanSAR 方式の観測モードである。スポットライトモードは高分解能モードよりもさらにやや高い空間分解能を有するが、観測領域が小さいことから実態上は洪水の観測ではほとんど使用されていない。ALOS-2 の特長は、他の SAR 衛星と比較して分解能が比較的高い（Stripmap で最高 3m）にも関わらずレンジ方向の観測範囲が広い（50 km）ため、広域の水害に対応できることである。アジマス方向の連続観測時間も長い（最大 48 分、1 分が約 400 km の観測長に相当）ため、広域の水害に対応できる利点の他に、取得データ量の多さから比較のための平時の画像（アーカイブデータ）が多く取得される利点もある。主に X、C バンドの周波数帯を用いる国内外の他の SAR 衛星は、技術的に高分解能化は容易であるものの観測幅は狭く、連続観測時間も短い。表 1-1 に示すように、例えばドイツの TerraSAR-X では連続観測時間が 3 分以下、カナダの RADARSAR-2 では 3m 分解能のモードにおける観測幅が 20 km といった制約がある[20][21]。

ALOS-2 の観測範囲は、SAR の原理的に観測不可である直下付近を除き、左右どちらかの計 2320km 幅の範囲から観測範囲を選択可能である[22]。次に述べるように、このように幅広くオフナディア角を選択できることは観測頻度の点で重要である。

図 1-4 に ALOS-2 の日本域付近のパス（衛星飛行経路）を示す。ALOS-2 は 14 日間ごとに同じ飛行経路に戻る準回帰軌道を周回しており、その 14 日（1 回帰）の間に地球を 207 周回する（それらをパス 1-パス 207 と番号付けして呼ぶ）。また、太陽地方時 12 時の太陽同期軌道でもあり（前述の準回帰と両方の性質をもつため太陽同期準回帰軌道と呼ばれる）、それぞれの地域の地方時で昼 12 時頃に南へ飛行（降交軌道）、夜 24 時頃に北へ飛行（昇交軌道）し、地球を南北に周回する。2015 年に水害が発生した常総市（方位 36 度、東経 140 度）を例にとると、回帰 1 日目の降交軌道では衛星はパス 19 を飛行し、飛行方向右側を見ると常総市を観測できる。同日夜の昇交軌道ではパス 117 を飛行し左側を見ると、距離が離れており大きなオフナディア角での観測にはなるが、再度常総市の観測が可能である。

表 1-2(a)に、1 回帰の間に ALOS-2 で常総市を観測できる機会を示す。オフナディア角はビームと呼ばれる単位で段階的に設定を行うため、ビーム番号と対応するオフナディア角を表 1-2(b)に示す。このように ALOS-2 は、様々なオフナディア角での観測となる（観測条件が日々異なる）ことを許容すれば、特定の場所を毎日観測することが可能である。ここでは常総市を例示したが、日本中どの地域でもこの結果は同様である。一方で、国内外の他の SAR 衛星の多くは技術的な制約または運用方針の観点から観測頻度に制約がある。例えば欧州の Sentinel-1 衛星は全世界のほぼ均一な頻度での網羅的な観測を特徴としており、2 機（将来的には 4 機）の衛星で 6 日に 1 回程度の頻度で観測がなされる一方で、特定の場所の毎日の撮像は行っていない。カナダの RADARSAT-2、ドイツの TerraSAR-X、イタリアの COSMO-SkyMed などは商用利用を含む多様なユーザからの観測要求に応じた観測を行って

おり、観測の優先度の観点から特定地域だけを対象とした高頻度観測は困難で、観測要求に多額のコストもかかる。1.1.2 節に述べた国際災害チャータ等の枠組みでは、観測要求とデータ提供を無償で行えるが、あくまで各国のベストエフォートによる協力の枠組みであり、高頻度の観測の協力は得られる保証がない。ALOS-2 は、オフナディア角および左右観測を容易に切り替えられる機動性を持ち、1 機の衛星でも特定の場所を毎日観測できることが特徴である。また日本の災害に対する観測の優先度が高いため、少なくとも日本国内の災害に対しては ALOS-2 を主軸とした洪水モニタリングの実現が期待される。

ALOS-2 の観測地方時は夜 0 時・昼 12 時であるが、国内外の他の多くの SAR 衛星 (Sentinel-1、RADARSAT-2、TerraSAR-X、COSMO-SkyMed など) は衛星システムの簡素化の観点から、朝 6 時・夕 18 時の軌道を周回している²。すなわち、ALOS-2 では他の多くの衛星で観測できない時間帯をカバーすることができる。特に深夜 0 時の観測は航空機や現地調査などの他の方法による情報収集が困難であり、この時間帯のデータを速報として使用し、翌朝からの初動に活用することは極めて重要と考えられる。

また、ALOS-2 は、X、C バンドと比べて波長の長い L バンドを使用しており、リピートパス干渉 SAR、すなわち同じ場所を同じパスから観測した過去データ (アーカイブデータ) との間での干渉処理が、地上の植生や過去データとの時間差の影響を受けずに安定して可能である。さらに、ALOS-2 は軌道が精密 (基準軌道から半径 500 m 以内) に保持されており、これも高い干渉性が得られる要因である。平時からアーカイブデータが整備されているのは一部のオフナディア角だけであるため、毎日の観測で干渉処理を行うことはできないが、日本域では最大でも 74 時間以内に干渉処理が可能なデータが取得できるようベースマップが整備されている[24]。

ここまで述べてきた ALOS-2 の特性をまとめると、空間分解能が高い (Stripmap 方式で最高 3m) こと、広域の観測が可能であること (3m 分解能の場合 50 km 幅)、高頻度で観測できること (強度画像は 1 日 1 回以上、干渉処理は最大 74 時間ごと)、干渉性が高いこと、他の衛星と異なる時間に観測できることが、洪水観測に適した主な特長である。一方で、毎日観測するためには日々異なるオフナディア角で観測しなければならないことには留意する必要がある。

² Dawn-dusk orbit と呼ばれる軌道で、衛星から見て横方向のほぼ同じ向きから太陽光が入射するため、太陽電池を太陽方向に合わせて駆動する必要が無い。また、ほぼ常時太陽光が入射するため日陰に備えて大容量の蓄電を行う必要も無い。このため、衛星システムを軽量・低コスト化しやすい[23]。

表 1-1 主な SAR 衛星の空間分解能、観測幅、および連続観測時間

衛星	周波数帯	観測方式	空間分解能	観測幅	連続観測時間
ALOS-2	L	Spotlight	1×3 m	25km	48 分
		Stripmap	3–10 m	50–70 km	
		ScanSAR	60–100 m	350–490 km	
RADARSAT-2	C	Spotlight	3 m	20 km	28 分
		Stripmap	10–25 m	50–100 km	
		ScanSAR	50–100 m	300–500 km	
Sentinel-1	C	Stripmap	5 m	80 km	25 分
		TOPS*	20 m	250 km	
COSMO-SkyMed	X	Spotlight	1 m	10 km	10 分
		Stripmap	3 m	40 km	
		ScanSAR	30–100 m	100–200 km	
TerraSAR-X	X	Spotlight	1 m	10 km	3 分
		Stripmap	3 m	30 km	
		ScanSAR	16 m	100 km	

*TOPS: Terrain Observation by Progressive Scans

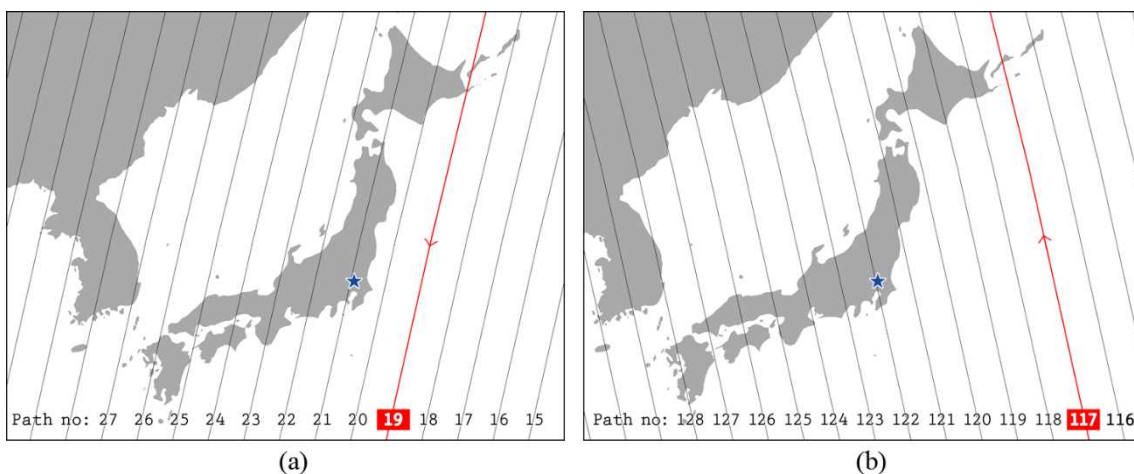


図 1-4 ALOS-2 の日本域付近の観測パス。(a)降交軌道（昼 12 時頃）の場合、(b)昇交軌道（夜 12 時頃）の場合。青の星印は例として茨城県常総市の位置。

表 1-2 ALOS-2 による茨城県常総市の観測機会。PALSAR-2 の高分解能 3m モードを使用した場合。(a)観測できる観測パス番号とビーム番号、(b)ビーム番号とオフナディア角、入射角の対応表。

(a)

日	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
降交軌道														
パス番号	19	22	25	14	17	20	23	26	15	18	観測	24	27	16
ビーム番号*	5R	2L	11L	20R	11R	2R	5L	14L	17R	8R	不可	8L	17L	14R
昇交軌道														
パス番号	117	120	123	126	115	118	121	124	127	116	119	観測	125	128
ビーム番号*	14L	5L	2R	11R	20L	11L	2L	5R	14R	17L	8L	不可	8R	18R

*L/R は左観測/右観測を表す。数字は(b)表を参照。

**「観測不可」は、衛星の直下となり、SAR の原理から観測が不可能なため。

(b)

ビーム番号	オフナディア角	入射角範囲	ビーム番号	オフナディア角	入射角範囲
1	9.6	8.0–13.1	13	46.4	51.6–53.8
2	13.9	12.8–17.8	14	48.0	53.7–55.8
3	18.0	17.5–22.2	15	49.5	55.7–57.6
4	21.9	21.9–26.4	16	50.9	57.5–59.3
5	25.6	26.2–30.4	17	52.1	59.2–61.0
6	29.1	30.2–34.3	18	53.3	60.9–62.5
7	32.4	34.1–38.0	19	54.3	62.4–63.9
8	35.4	37.8–41.3	20	55.3	63.8–65.2
9	38.2	41.1–44.4	21	56.2	65.2–66.5
10	40.6	44.3–47.0	22	57.0	66.4–67.7
11	42.7	46.9–49.5	23	57.7	67.7–68.9
12	44.7	49.3–51.7	24	58.4	68.8–70.0

1.3. 過去の研究

1.3.1. SAR 観測における洪水の種類別

SAR データから洪水域を抽出する研究は数多くなされており、本節ではそれらの既往研究について述べる。まず前提として、SAR で観測されるのは地上からの後方散乱であり、SAR で洪水をモニタするにあたっては、その場所の土地被覆や浸水状況に応じてその散乱

過程にいくつかのタイプがあることを考慮しなければならない。

図 1-5 に、SAR データで異なる取扱い方を要する 3 つの浸水状況のタイプを示し、それらの定義を次に述べる。

- ① 完全冠水は農地や裸地などに典型的なタイプで、大半の地物が水没し、表面がほぼ水面となった状況である。SAR で使用する電波は水を透過しないため、水面で鏡面反射し、後方散乱はほとんど観測されない性質を持つ。ただしこれには 1.3.2 節に述べるように SAR の波長への依存性があり、波長の短い X バンドなどでは水面が波立って表面粗度が大きくなる場合に強い後方散乱が観測されうるが、L バンドではこの影響は少ない。
- ② 建物浸水は家屋の床上・床下浸水などに相当し、建物などの人工構造物が、完全には水没せず下部のみ浸水している状況である。入射する SAR の電波は水面と垂直構造物（建物の壁）による二回散乱により強い後方散乱を生じる。このような直交する二面からの反射は再帰性反射と呼ばれ、入射した方向と同じ方向に最も強い反射波を返す性質があるため、極めて強い後方散乱が観測される。ただし、これは壁が衛星方向に正対している場合のみであり、建物の壁が衛星と異なる方位を向いている場合には SAR では強い後方散乱は観測されない。すなわち、衛星の観測方位による依存性がある。
- ③ 植生浸水は、ここでは森林のような高い植生の下部のみが浸水している状況を指す。典型的には②の建物浸水と同様に水面と垂直構造物（木の幹）による二回散乱効果で強い後方散乱が観測される。ただし、②と異なり、樹木の構造は方位に対してほぼ等方的であると考えられ、観測方位に関係なく二回散乱が観測される[25][26]。これは森林への透過性が高い L バンド SAR の特徴であり、X、C バンドではほとんど観測されない。

これらのうち③植生浸水は、例として雨季のアマゾン川流域の熱帯雨林で典型的に見られ[27]、国内の水害では小領域でまれに見られるが大規模に起こることはない。これは日本の地理的条件によるもので、洪水が発生しうる平坦な土地は多くが農地や市街地として開発されており、森林は洪水が滞留しない山岳域に集中しているためである。そこで、現時点では本研究においては①完全冠水、②建物浸水の抽出を主に扱うこととし、これらに対するこれまでの研究を次節以降に述べる。③植生浸水は本研究では基本的には扱わず、第 5 章で開発する自動洪水抽出アルゴリズムに③にも対応できるような将来的な拡張性を持たせる。

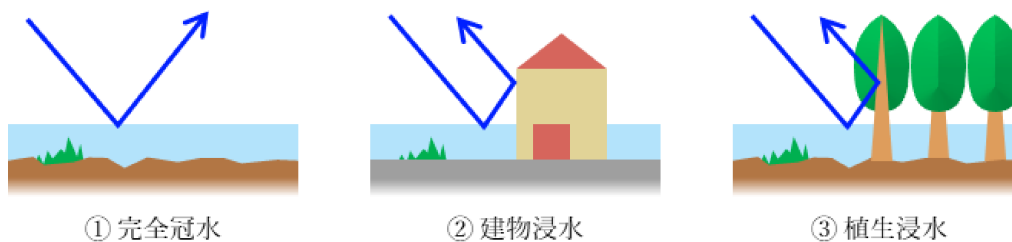


図 1-5 後方散乱過程の異なる3つの洪水タイプ

1.3.2. 完全冠水の抽出

地物が完全に水没する完全冠水（図 1-5 の①）では、SAR で得られるデータのうち、後方散乱の強度を表す強度画像が有効である。

SAR で観測される後方散乱強度は、地表面の状態によって異なる。図 1-6(a)に示すように表面が一定の粗度と誘電率を持つ単純な面と仮定すると、水面など滑らかな表面では鏡面反射のため後方散乱がほとんどなく、粗い地面や農作物などで表面の粗度が大きいほど後方散乱の割合が大きくなる[28]。よって、SAR で後方散乱の強度が小さい領域を検出することにより洪水域を抽出するのが基本的な手法となる。

ただしここでいう粗度とは波長に対する相対的なものであり、SAR で用いる電波の周波数に応じてスケールが異なることに注意を要する。Rayleigh 条件によれば、表面の凹凸の高さが波長と比べて十分小さければその表面は滑らかと見なすことができ、電波は主に鏡面反射される[29]。ALOS-2 で使用されている L バンド（波長約 24cm）は、国内外の他の多くの SAR 衛星と比べ波長が長く、Sentinel-1 や RADARSAT-2 は C バンド（波長 5–6cm）、TerraSAR-X や COSMO-SkyMed は X バンド（波長約 3cm）である。ALOS-2 で用いる L バンドの電波は、C、X バンドと比べて地面の小さな凹凸や疎な植生があっても鏡面と同様に反射しうするため、水面と区別しにくい。図 1-7 に L、C、X バンドの実際の SAR 強度画像における水域の見え方の違いを示す。これらのデータは航空機 SAR の Pi-SAR-L（L バンド）、衛星の RADARSAT-2（C バンド）、TerraSAR-X（X バンド）による観測と、現地調査（株式会社建設技術研究所が調査を実施し情報提供）とを 2009 年 3 月 6 日（RADARSAT-2 のみ 3 月 5 日）に行ったキャンペーン観測で得られた。これは洪水ではないが、種子島（鹿児島県熊毛郡南種子町）において通常の農事（早場米の作付け）に伴う冠水を洪水に見立てて同期観測したものである。図 1-7 の A 周辺は現地調査によれば冠水した水田であり、いずれの画像でも明瞭に暗い（後方散乱が小さい）。一方で、B、C は水が少ない（部分的に水たまりがある程度）または水が全くない圃場であり、B は耕起されており地面の粗度が大きく、C は地面が比較的平坦である。C バンド、X バンドの画像は似通っており、圃場 B、C はいずれ

れも水面より明るく区別が可能であるが、Lバンドの画像では地面の平坦なCは水域と同程度に暗い領域もあり、Lバンドでは水域と表面の滑らかな非水域を区別しにくいことが分かる。

このようにC、Xバンドは強度画像において洪水と非洪水をより区別しやすいことから、従来からよく洪水域抽出に用いられてきた[30][31]。Lバンドでは研究が少ないものの、初のメートル級分解能の民用LバンドSAR衛星であるALOS-2の打上げ以降に研究が増えており、特に平成27年(2015年)関東・東北豪雨は海外の衛星でも観測データが少ないことから、強度画像による洪水域抽出の検討によく用いられてきた[32][33][34]。

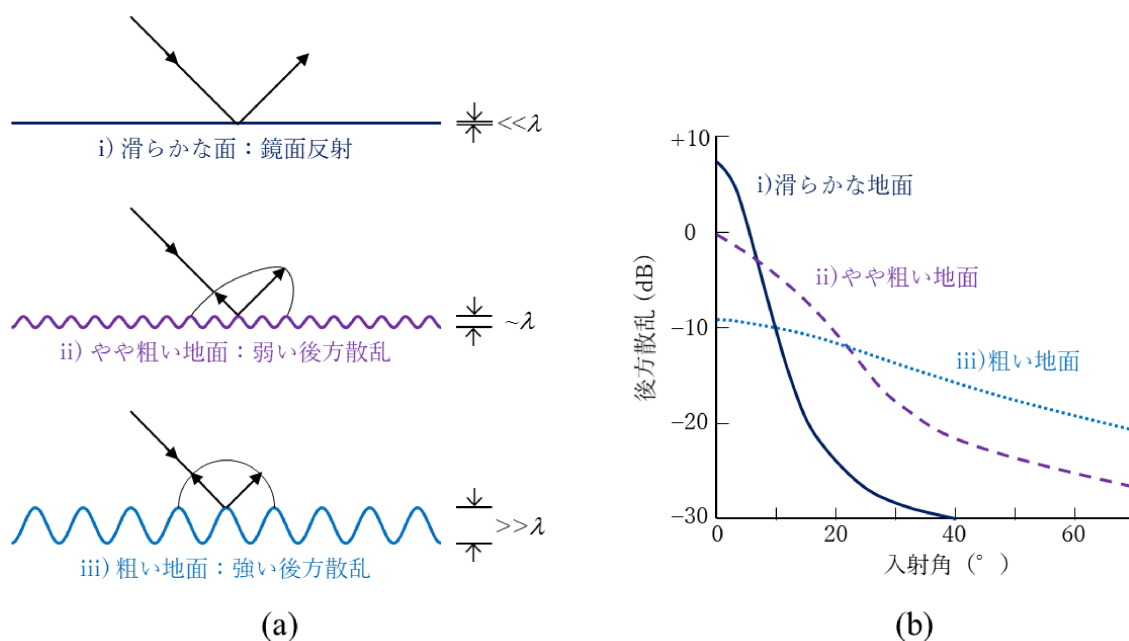


図 1-6 (a) SAR 入射波の散乱特性の表面粗度に対する違いと、(b)それぞれの表面粗度における後方散乱強度の入射角依存性の模式図。T. G. Farr (1993) [35]をもとに作成。

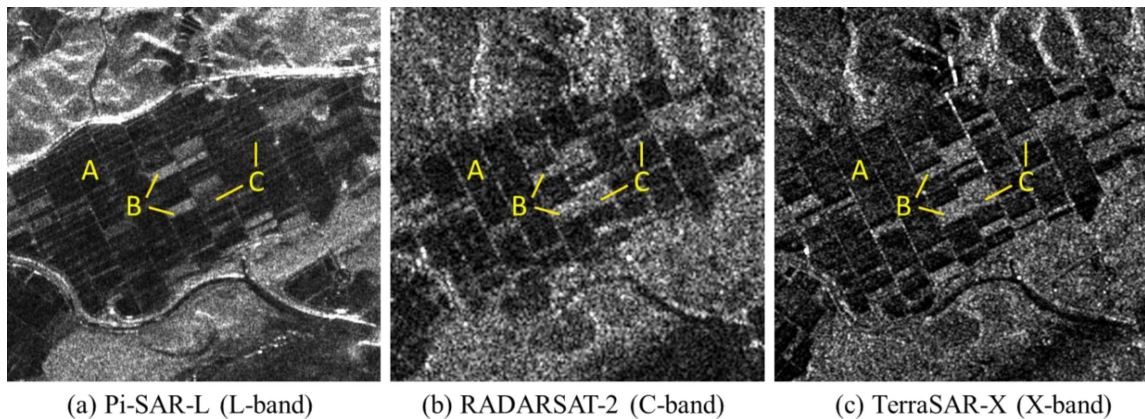


図 1-7 異なる3つの周波数の SAR 強度画像における、水域の見え方の違い。A は冠水した圃場。B および C は水が少ないまたは全くない圃場で、B は耕起されており地面の粗度が大きく、C は地面が比較的平坦である。

強度画像による洪水域抽出にあたっては、入射角依存性が大きいことにも注意を要する。図 1-6(b)に粗度に応じた後方散乱と入射角の関係を示す。10° を下回る小さな入射角においては、観測方向が直下に近いことから鏡面反射が後方散乱に漏れこみ、滑らかな水面のほうで逆に後方散乱は大きくなる逆転現象が起こる[35]。一方 60° 程度を越える大きな入射角においては、粗い地面も水面も著しく後方散乱が低下し、その差は小さく、共にノイズレベルに近づき、判別困難となる。これらのことから、強度画像による洪水域の判別には適切な入射角（またはオフナディア角）が必要である。また、洪水域を判別する閾値などのパラメータもまた入射角に応じて変わる。

1.2 節に示したように、観測頻度を増やす（例えば 1 日 1 回以上の頻度で観測する）ためには、なるべく多くのオフナディア角を使用することを許容する必要がある。しかし、過去の研究では精度を優先し理想的なオフナディア角のデータのみを使用したものが多く、実用化に向けて必要な幅広いオフナディア角のデータを検証した例が少ない。X バンド SAR では Pulvirenti らが様々なオフナディア角のデータを利用して時系列的な洪水域抽出を行っている[36]。ALOS-2 のような L バンド SAR に対しては、筆者が研究を行うまで様々なオフナディア角に対する洪水抽出への適用性、その抽出精度、閾値について網羅的に調べた研究はなく、高頻度の洪水モニタリングの実現性は不明であった。

完全冠水の抽出に関する既往研究の状況をまとめると、強度画像による洪水域抽出が一般的であり、特に水域を判別しやすい C、X バンド SAR 衛星の研究や活用が先行している。ALOS-2 は水域をやや判別しにくい L バンドを用いているものの、1.2 節に述べた観測頻度の高さなどその弱点を十分補う優位性を持っており、洪水域抽出への有効性を十分検証すべきであるがこれまで研究が少なかった。特に、高頻度のモニタリングの実現に必要な、

様々なオフナディア角を用いた洪水域抽出の検討が不足していた。

1.3.3. 建物浸水の抽出

建物浸水(図 1-5 の②)は、人命や資産への被害が大きいためには検出することの重要性は大きいですが、従来の SAR の強度画像を用いた方法には限界があり、抽出が困難であった。1.3.1 節に述べたように、二回散乱効果により強度が増加することで抽出できる事例もあるが[37][38]、この手法は建物の壁が衛星方向に正対している場合のみ有効であり、そうでなければ衛星方向に二回散乱が返らないため強度は変化しない。むしろ、浸水深が深く建物の構造の大部分が水没するような場合、前節の完全冠水に近い状況となり強度は低下することになる。このように、建物浸水時の強度の変化は多様であり、強度から建物浸水を確実に抽出することは難しい。

代わりに、強度では捉えられない位相レベルの変化を抽出する干渉処理の利用が考えられる。SAR で建物の内部の浸水の有無を検知することは難しいが、建物の周囲が水面で囲まれる(本研究ではこの状態を建物浸水と定義する)ことにより建物からの電波散乱過程が変化することは捉えられる可能性がある。SAR データにおける位相の情報は、電波の往復距離を波長で割った剰余(を角度に変換したもの)であり、単体の SAR データの位相は乱雑であり意味のある情報を得ることは難しいが、2 時期の SAR データの位相差をとると地表との距離の変化に関する有用な情報が得られる。2 時期のデータで建物などの地物の形状に変化がなければ位相差は空間的に一様となるが、洪水により電波の散乱経路が変われば位相差はばらつき、空間的に統計をとると両者の類似性が低下していることが分かる。この状態を干渉性(コヒーレンス)が低下するという。干渉処理は2回(以上)の SAR 観測データをサブピクセルスケールまで精密に位置合わせし、僅かな位相差の情報を引き出すもので、比較的高度なノウハウと計算時間を要することから強度画像の解析と比べれば広く普及はされていない。干渉性を利用した建物域の洪水抽出は海外の X、C バンドの SAR 衛星ではよく検討されており、建物の方向に関わらず良好に洪水域が抽出可能であることが分かっている[39][40][41]。ALOS-2 など L バンドの SAR では、その波長の長さから X、C バンドよりも感度は低いと思われるが、限られた数の事例では成功例が報告されており[42][43][44]、実際の災害対応で利用できるよう、より多くの災害事例や観測条件での検証を行う必要がある。

なお、この干渉性を用いた洪水抽出はあくまで建物浸水に対してのみ有効であり、前述の完全冠水型の洪水をこの手法でまとめて抽出することはできない。これは、完全冠水が発生しやすい裸地や農地、低植生地などはもともと平時から干渉性が低く、災害によって干渉性

の低下を捉えるのが難しいためである。よって、完全冠水型の洪水には SAR の強度、建物浸水には SAR の干渉性の情報を、それぞれ相補的に用いる必要がある。

建物浸水の抽出に関する既往研究の状況をまとめると、やはり波長の短い C、X バンドを用いた研究が先行しており、SAR の干渉性の情報を用いるのが有効と考えられる。波長の長い L バンドにおいても抽出が可能であるかどうかは、様々な事例や観測条件で比較し検証する必要がある。また、干渉性を表す指標は、よく用いられるコヒーレンスや、干渉位相の標準偏差などいくつか考えられるが、どれを用いるのが建物浸水の抽出に最も有効であるかも不明で、それらの指標の理論的な背景も十分に理解されていないことから、ALOS-2 の実データの解析に加えて理論的な検討も必要である。

1.3.4. 洪水域抽出の統合化と自動化

ここまで述べてきたように、SAR データによる洪水域抽出は完全冠水と建物浸水とで適切な抽出の原理が異なる。これらを統合し、どちらのタイプの洪水も抽出できる手法が必要である。また、実用化に向けては処理の自動化も必要である。

完全冠水については、粗度への感度が高い X、C バンド SAR の画像であれば、強度画像を自動的に二値化する（強度が閾値より小さいものが洪水と見なす）ことが比較的容易である。閾値を自動推定するには、ヒストグラムから画像の明るさを 2 グループに分ける大津の方法[45]や Kittler-Illingworth 法[46]などを用いることができる。このとき画像全体に対しヒストグラムをとると洪水域が少ない場合に洪水域の分布が全体の分布に埋もれてしまうため、Martinis らは画像を分割し、変化している小領域に着目して閾値を決定する画像分割アプローチを提案し[47]、類似した方法は C、X バンドで用いられている[48][49][50]。一定の閾値ではなく地面の凹凸への感度が低い L バンドでは、ヒストグラムが明瞭に分かれないためこの方法での自動化は難しい。

完全冠水と建物浸水を統合する方法としては、複数の入力（強度や干渉性の情報）から必要な出力（洪水か否か）を得る数理モデルを教師データにより構築する、いわゆる機械学習のアプローチを用いたものが近年 C、X バンドなどの海外衛星で用いられているが[51][52][53]、課題の 1 つは計算量が膨大であることである。昼夜・天候に関わらず観測ができる SAR には他の手段よりも早く洪水域抽出を行うことが期待されており、特に ALOS-2 では観測の広域性を活かし、どの地域で被害が大きいかなどの情報がなく解析範囲を絞り込めない段階で、高速に広域のデータを処理して洪水の全体像を把握する必要がある。本研究で主に用いる ALOS-2 の高分解能 3m モードのデータサイズは 1 シーン（約 50km 四方）あたり約 6GB であり、複数シーンにまたがる場合もある事から、処理すべきデータ量は膨

大である（ただし標高データやハザードマップを用いてある程度解析領域を絞り込むことは可能である）。また機械学習のもう1つの課題は教師データの不足である。SARで洪水を観測した事例の数が限られており（ALOS-2では現在国内水害で20事例程度）、現状では様々なオフナディア角などの条件にまんべんなく対応できるモデルを構築するに十分な教師データがない。既往研究では同じ観測データから教師データと検証データの両方を取得しているものが多く、条件の異なる様々な観測データに適応できる再現性・汎化性が実証されていない。このように1.1.2節に述べたような迅速性や高い頻度（様々な観測条件に対応する）などのユーザーニーズを満たすには課題が多く、実用化にやや遠い。

シンプルだがより高速でロバストな処理が可能な数理モデルとして、GiustariniらはXバンドのSARデータを正規分布などでモデル化し、強度や干渉性などの複数のパラメータをベイズ推定などで確率的に統合するアプローチを提案し[54]、類似の方法はC、Lバンドでも有効であるとの報告がある[55]。単純にSARデータを二値化（洪水であるかないかの0、1のみ）する決定論的な方法と比べ、あいまいな確率（0から1までの連続的な値）に変換するこのような確率論的方法は、その確率をSARデータ以外のパラメータで変動させることができるため、SARデータをリモートセンシング以外の多様なデータと組み合わせるのにも適している[56]。特に、気象・河川モデルによるシミュレーションデータをSARと統合して精度を向上することは有効である。D'Addabboらは、前述の確率的アプローチにおいて洪水シミュレーションデータを事前確率として導入することにより高精度化を図っている[57]。ただし、この研究では分類カテゴリ数が多い、必要な確率分布が複雑（多数の正規分布の足し合わせなど）で多数のサンプルデータが必要である、結果の解釈に人の判断が必要である、など、迅速性、汎用性に課題が残る。

このように、強度画像、干渉処理画像などSARで得られる情報を総合的に利用した洪水域抽出の研究や、その処理の自動化の研究は多くなされているが、迅速性と汎用性を両立したものがなく、高速化のための処理の簡素化と同時に、オフナディア角などの観測条件の異なる多くの事例での再現性の検証が必要である。また、確率的方法により洪水シミュレーションなどSAR以外のデータを組み合わせることも有効だが、特にLバンドでは研究が少なく、ALOS-2データを用いた網羅的な検討を行う必要がある。

1.4. 本研究の目的

本研究では、1.1.1節に述べたユーザーニーズを踏まえ、高分解能・高頻度の洪水域モニタリングを実現し防災・減災に資することを目的とし、1.3節に述べたこれまでの課題を踏ま

え、SAR による洪水域抽出について多面的な検討を行った。近い将来に達成すべき大目標は多くの SAR 衛星を用いた国内外の水害の洪水域のモニタリングを実用化することであるが、その中でもまず取り組むべき課題として、本研究では特に日本の洪水の観測事例が多く観測頻度も高い ALOS-2 を用い、ALOS-2 が高い優先度で観測を行っている日本国内の水害の洪水域の抽出を実現することを目的とした。手法の開発にあたっては、国内外の X、C バンド等の衛星にも転用可能な手法を用い、将来的に多衛星の組み合わせによりさらに高頻度化することも考慮した。国外の洪水についても将来的に対応可能な拡張性を持たせた手法を用いることとした。

具体的な目標としては、実用化のためにユーザのニーズを満たすアウトプットを出すことが必要であることから、1.1.1 節に述べたユーザニーズを全て満たすアルゴリズムを開発することを目指す。すなわち、高分解能（主として 3m 解像度モードを用い、洪水域のアウトプットは 10m 程度とする）、広域（3m 解像度モードでは 50km 観測幅）な ALOS-2 データを用いて、迅速（2 時間以内に処理可能であること、ただし本研究で用いる標準処理データの処理・提供にかかる時間 1 時間程度を差し引くと、残り 1 時間程度以内）、高精度（観測条件が悪くても 6 割以上の精度を確保）、かつ高頻度のモニタリングが可能（幅広いオフナディア角に対応することにより 1 日 1 回以上の頻度で洪水域を抽出）なアルゴリズムを開発する。また、発展的な課題として、浸水域の面積変化などのダイナミズム把握や浸水深の推定についてもその実現性を示すこととする。これらの実現には ALOS-2 の L バンド SAR データにおける洪水域の見え方について多面的に理解する必要がある、次に述べるようないくつかの研究を行った。

まず第 3 章においては、強度画像による完全水没型の洪水抽出について、ALOS-2 の様々なオフナディア角、解像度、偏波等の異なる観測条件による洪水抽出の可否や精度、閾値の違いを網羅的に調べ、洪水域抽出に適した観測条件や最適な閾値を明らかにすることを目的とする。これらの観測条件や閾値等は以降の解析に生かされる。

次に第 4 章では、干渉性を用いた建物浸水について、ALOS-2 データを用いた解析を行う。強度画像と比較すると干渉処理が可能なデータは少なく、建物域が大規模に浸水した状況を観測できた事例も少ないため、そのデータの振る舞いを理解するには実データのみでは不足するため、建物域の SAR データをモデル化したシミュレーションも併せて行う。干渉性を表す指標として従来的にはコヒーレンスがよく用いられるが、その他の指標も含めどのような指標が建物洪水の抽出に適しているか、それらの閾値や精度、またそれらの指標の限界なども明らかにする。

さらに第 5 章では、これらの知見を組み合わせ、建物・非建物洪水の両方を抽出可能な高速な自動処理アルゴリズムを開発する。上記の ALOS-2 の SAR 強度と干渉性の情報に加えて、東京大学と JAXA が開発・運用しているシミュレーションシステム「Today's Earth」(TE)

で提供されている気象・河川モデルによる洪水シミュレーションデータを組み合わせることにより高精度化、高速化を図る。TE は洪水などの河川パラメータを準リアルタイムで公開しており、全球のデータを提供している（日本域は特に高い時空間分解能で提供している）ため、全世界いずれの地域の解析にも適用できる汎用性がある。最終的な洪水域の情報は画像（ラスターデータ）ではなくポリゴン（ベクタデータ）として出力する。ポリゴンはリモートセンシングを専門としない災害対応従事者、行政担当者などのエンドユーザにも分かりやすく、地理空間情報システム（GIS）でも扱いやすい。また、データ量も少なく、観測後速報を速やかにユーザに提供できる。

本論文の目的や各章の内容の関係を図 1-8 に示す。また、既報の論文の内容との関係を表 1-3 に示す。2 章は、本論文で扱う災害事例や解析データに関する共通的な説明である。3 章では完全冠水（非建物の洪水）、4 章では建物浸水、5 章ではそれらを統合し洪水シミュレーション等も組み合わせた自動洪水域抽出アルゴリズムについて述べる。これらは査読付き論文で既報の内容を整理し、一部新たな結果や考察を加えたものである。

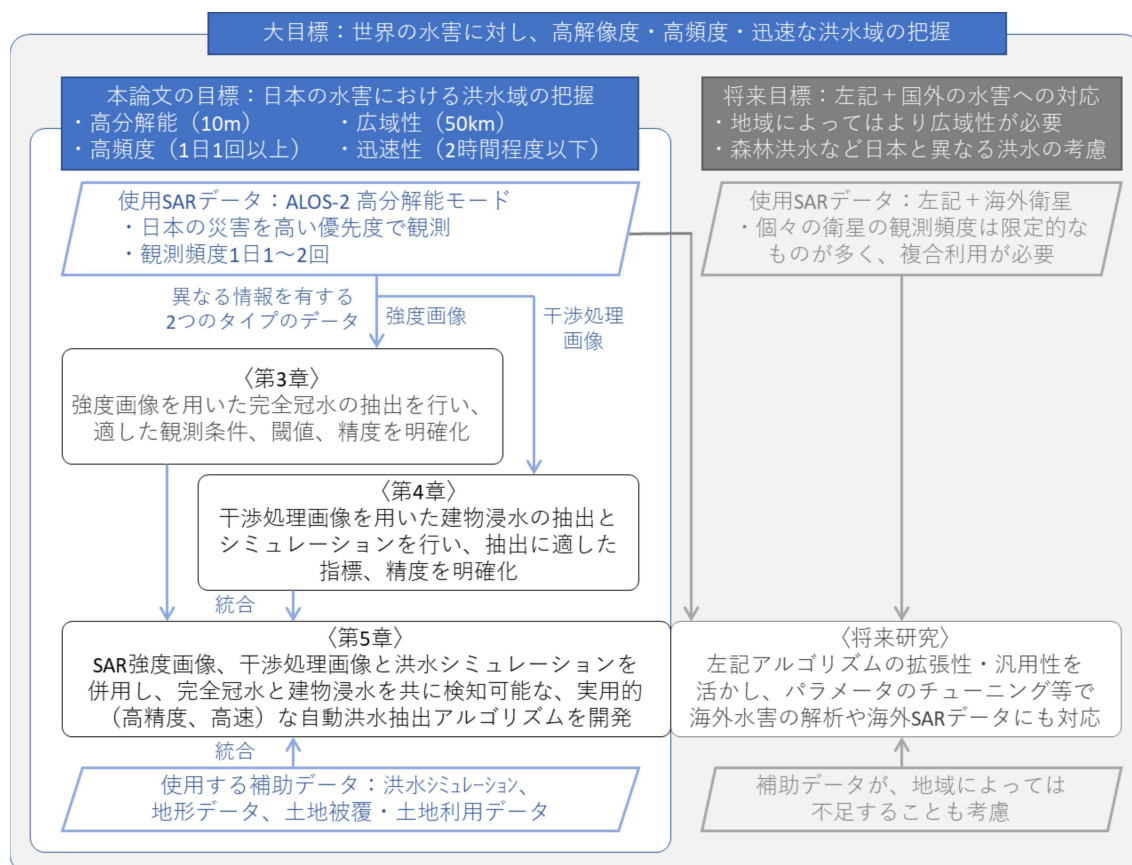


図 1-8 本論文の目的や各章の内容の関係。

表 1-3 本論文の各章と既報の論文との関係

2章	本論文で扱った災害事例や解析データに関する、3~6章に共通した説明。
3章	強度画像を用いた完全冠水（非建物域の洪水）の抽出を行い、抽出に適した観測条件や最適な閾値を明らかにする。下記*1の内容を基本とし、テストデータの追加と、時系列的な解析による浸水域ダイナミズムの把握に関する考察を追加。
4章	干渉処理画像を用いた建物浸水の解析とシミュレーションを行い、抽出に適した指標や閾値を明らかにする。*2の内容を基本とする。
5章	3章・4章の建物域・非建物域の洪水抽出の知見を統合し、洪水シミュレーションなども併用し、高速で高精度な実用的な自動洪水抽出アルゴリズムを開発する。 *3の内容を基本とし、テストデータに近年観測された水害の事例を追加した。また、浸水深の推定の内容を追加。

*1 M. Ohki et al., “Flood Area Detection Using PALSAR-2 Amplitude and Coherence Data: The Case of the 2015 Heavy Rainfall in Japan,” IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observations Remote Sensing, vol. 12, no. 7, pp. 2288–2298, 2019.

*2 M. Ohki, T. Tadono, T. Itoh, K. Ishii, T. Yamanokuchi, and M. Shimada, “Flood Detection in Built-Up Areas Using Interferometric Phase Statistics of PALSAR-2 Data,” IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 17, no. 11, pp. 1904–1908, 2020.

*3 M. Ohki, K. Yamamoto, T. Tadono, and K. Yoshimura, “Automated Processing for Flood Area Detection Using ALOS-2 and Hydrodynamic Simulation Data,” Remote Sensing, vol. 12, no. 17, p. 2709, 2020.

*その他関連する論文や研究発表等を P.121 の「本研究に関連する発表リスト」に示す。

1.5. 本研究の新規性

本研究の特徴と主な新規性を、既往研究との比較とともに表 1-4 に示す。

SAR を主軸として洪水域抽出を行う研究は数多いが、本研究は、特に日本国内の水害において省庁や研究機関等の防災関係機関と共に SAR の利用実証を行ってきた筆者の経験に基づき、国内の防災ユーザのニーズにマッチした、災害対策への実利用に供することができるアルゴリズムを開発した点が特徴である。具体的には、既往研究の多い X バンド SAR ではなく、広域かつ高頻度の観測が可能な L バンド SAR を搭載した ALOS-2 を用いた。既往研究にも ALOS-2 を用いたものはあるが、オフナディア角などの幾何条件が特に良好な一部のデータのみが使用され、ALOS-2 の高頻度性が活かされていなかった。そこで本研究では幾何条件が理想的でないデータも含め高頻度の ALOS-2 データの網羅的な検証を行った。また、従来は困難であった建物浸水の検出のために干渉処理の有効性も理論的なシミュレーションおよび ALOS-2 の実データで実証した。さらに、TE が提供する準リアルタイムの

洪水シミュレーションを初めて SAR の解析と組み合わせて用い、ALOS-2 による洪水域抽出の高速・高精度化、自動化を図った。

本研究の成果を用いると、洪水域を 1 日 1 回以上の頻度で、極めて迅速かつ（速報としては）十分な精度で提供できるようになる。日本国内で多い時間スケールの短い洪水（持続時間が 1～2 日程度）も高い確率で捉えることができ、長時間続く洪水（数日～数週間程度）に対してはその日々の変化も把握することができるようになる。これは、人命救助、排水作業、インフラ等の被害把握と復旧、災害後の復旧計画など、初動から復旧フェーズまでの災害対応の様々な場面に対して有用な情報となる。

本研究は SAR 衛星としては ALOS-2 を用い、解析対象として日本国内の災害を扱った。将来的には、ALOS-2 の後継機である ALOS-4 や、海外の SAR 衛星も複合利用すればさらに高い頻度や精度で洪水域およびそのダイナミズムを把握できるようになる。また、アルゴリズムのチューニングにより国外の災害にも適用できれば、世界的に増加する水害に対してその減災に貢献できる。

表 1-4 本研究の特徴（新規性）と既往の研究との比較

本研究の実施項目	既往の研究の状況	本研究の特徴（新規性）
SAR の様々な観測条件による洪水抽出の精度や閾値の検証	海外の X バンド SAR では検証された事例がある。	L バンド SAR では本研究が初めて網羅的に検証し、様々なオフナディア角が洪水抽出に使用できることを実証。
ALOS-2 を用いた 1 日 1 回以上の高頻度での洪水モニタ	海外 SAR は軌道や観測機会の点で毎日の観測は困難で、複数の衛星の併用が必要で、それでも観測できない時間帯がある。	上記により様々なオフナディア角のデータが使用できるため、ALOS-2 一機でも 1 日 1 回以上のモニタリングを実現。また、他の衛星では観測できない地方時 12 時の観測が可能。日毎のデータから浸水面積の変化や浸水継続日数の推定も可能。
建物浸水の抽出	海外 SAR や ALOS-2 でも一部の観測データについて解析が試みられており、干渉処理画像の利用が有望。	複数の観測事例の解析と理論的なシミュレーションを行い、干渉処理画像の有効性を確認。さらに、干渉性の指標として従来のコヒーレンスに加えて位相統計量の重要性を指摘。
洪水シミュレーションと SAR の併用	海外 SAR ではローカルな領域の洪水シミュレーションと SAR の複合研究事例がある。	全球規模の準リアルタイムシミュレーションである Today's Earth のデータを初めて SAR の解析と組み合わせ、高速化、高精度化に成功。
洪水域抽出の自動化	ALOS-2 では個別の観測事例ごとにアドホックな解析手法が試行され、観測条件の異なる様々な観測事例に対して再現性のある統一されたアルゴリズムがない。	幅広いオフナディア角に対応した全自動の洪水抽出アルゴリズムを L バンドでは初めて開発し、これまでの ALOS-2 のほぼ全ての国内水害の観測データで検証し、再現性を確認した。

第2章 水害事例と使用データ

本章は、次章以降で扱う災害事例、使用する ALOS-2 データ、ALOS-2 により抽出した洪水域の精度検証に用いる参照データ、およびその精度検証方法など、本論文で用いるデータについての共通的な説明を集約したものである。

2.1. 本論文で扱う水害事例

本論文では、日本国内で発生した洪水について、ALOS-2 を用いてその洪水域抽出と精度検証を行う。1.3 節で述べたように、既往研究は少数の災害事例に特化して精度を向上しようとする事例研究が多く、実用化に向けてはオフナディア角などの観測条件、地理的条件（地形など）や洪水の発生状況（貯留型洪水であるか、流下・拡散型の洪水であるか、内水・外水など）などが異なる多くの事例で再現性を確認する必要がある。そこで、本論文（特に第5章）においては、次の条件に合致するものを原則として全て解析した。

- ① 日本国内の豪雨による洪水において冠水中に観測した ALOS-2 データであること。
- ② 必要な空間分解能の観点から、ALOS-2 の高分解能モードで観測されたデータであること（原則 3m 分解能）。
- ③ 洪水抽出精度の観点から、オフナディア角は約 48 度以下とする。ただし第3章におけるオフナディア角依存性の検証のために平成 27 年（2015 年）関東・東北豪雨については 50 度を超えるオフナディア角のデータも使用する。また、令和 2 年 7 月豪雨でも冠水中のデータが少ないため 50 度を超えるオフナディア角のデータを一部使用する。
- ④ 検証に必要な国土地理院による推定浸水域データがあること。

表 2-1 に、これらの条件に合致し本論文で扱った洪水観測事例を示す。平成 27 年 9 月関東・東北豪雨は、2015 年 9 月 9 日から 11 日にかけて温帯低気圧の影響により線状降水帯が形成され記録的な豪雨が発生し、関東・東北の各地で堤防決壊や越水等による浸水被害が発生したものである。ALOS-2 による観測の行われた常総市周辺では、鬼怒川が 10 日の午前 6 時頃に越水、13 時頃に破堤し、市内の鬼怒川左岸側のほぼ全域が洪水被害を受け、完全な排水まで約一週間を要した。同市における床上浸水家屋は約 4400 戸にのぼる[58]。平成 28 年台風第 9 号（Mindulle）は、この年に相次いで北海道に上陸した台風の 1 つで、線状降水帯を伴って常呂川流域全体に記録的な豪雨をもたらした。越水と破堤により、主に北見市内の河川設備や農地が洪水被害を受けた。平成 30 年（2018 年）7 月豪雨は、台風第 7 号（Prapiroon）

や梅雨前線の影響による豪雨で西日本を中心に広域で河川氾濫などの被害が発生したものである。ALOS-2による観測の行われた倉敷市では、小田川で複数の破堤が発生し、広範囲が冠水、全・半壊家屋は約5500戸であった[59]。令和元年8月の前線に伴う大雨は、九州の広い範囲で秋雨前線に伴う線状降水帯が発生して記録的な大雨となったもので、ALOS-2による観測の行われた佐賀県の六角川および牛津川流域では、約1100戸の床上浸水が発生した[60]。令和元年東日本台風（台風第19号、Hagibis）は関東甲信、北陸、東北地方を中心に記録的な豪雨をもたらし、各地で河川の決壊・越水による氾濫が発生した。本研究で主に解析対象とする長野市・千曲市における千曲川の氾濫では全・半壊家屋は約2600戸であった[61]。令和元年10月の低気圧に伴う大雨は、太平洋沿岸の低気圧および日本の東海上にあった台風第21号の影響により関東・東北地方の広範囲で記録的な豪雨となったもので、ALOS-2による観測の行われた千葉県では県内各地で洪水被害が発生した。令和2年7月豪雨は、停滞した梅雨前線の影響で広域にわたる豪雨が発生し、特に九州地方では4-5日に渡って記録的な豪雨が続いた。本研究で主に解析対象とする人吉市における球磨川の氾濫では約4700戸の床上浸水が発生した[62]。

これらの事例のうち、第3章では平成27年（2015年）9月関東・東北豪雨、第4章では平成27年9月関東・東北豪雨と平成30年（2018年）7月豪雨、第5章では表2-1の全ての事例を扱う。

顕著な洪水が発生したにも関わらず本研究で扱えなかった水害もある。例として平成29年（2017年）北九州豪雨は、冠水が極めて短時間でありALOS-2では洪水の瞬間を捉えることができなかったため、本論文で扱えなかった。また、洪水が広域にわたり、ALOS-2の観測幅では全てを網羅できない場合もある。例として、令和2年（2020年）7月豪雨においては、表2-1に示した熊本県、福岡県以外に、山形県において最上川水系最上川の氾濫が発生しているが、ALOS-2では観測の範囲に含まれていない。ALOS-2の後継機として開発中のALOS-4では観測幅の向上で、より広域の災害観測が可能となることが期待される[63]。

表 2-1 本論文で扱う水害事例

災害名	発災年月	本論文で扱った氾濫域の 主な地名	左記地域の氾濫の 原因である主な河川
平成27年9月関東・東北豪雨	2015年9月	茨城県常総市	利根川水系 鬼怒川
平成28年台風第9号 (Mindulle)	2016年8月	北海道北見市	常呂川水系 常呂川
平成30年7月豪雨	2018年7月	岡山県倉敷市	高梁川水系 小田川
令和元年8月の前線に伴う大雨	2019年8月	佐賀県小城市、武雄市、 江北町、大町町、白市町	六角川水系 六角川、 六角川水系 牛津川
令和元年東日本台風 (台風第19号、Hagibis)	2019年10月	長野県長野市、千曲市	信濃川水系 千曲川
		茨城県那珂市、水戸市	那珂川水系 那珂川
令和元年10月の低気圧に伴う 大雨	2019年10月	千葉県佐倉市	利根川水系 鹿島川、 利根川水系 高崎川
令和2年7月豪雨	2020年7月	熊本県人吉市	球磨川水系 球磨川
		福岡県小郡市、大刀洗町、 久留米市	筑後川水系 筑後川

2.2. 使用した ALOS-2 データ

本研究で使用した ALOS-2 データを表 2-2 に示す。ここに示した観測時刻は、災害時のデータであり、第 5 章ではこれのほかに災害前の過去データも使用している（第 5 章で詳述する）。JAXA が処理し一般に提供されている ALOS-2 の標準処理データは主に、①校正のなされたレーダ座標系（画像の横がレンジ方向、縦がアジマス方向）における 1 ルック（平均化を行わないオリジナルの解像度）の複素画像（Single Look Complex、SLC）であるレベル 1.1 データ、②データを強度に変換し（位相の情報は失われる）地図座標に投影したレベル 1.5 データ、③これに加え地形による歪みを補正するオルソ処理がなされたレベル 2.1 データなどがある。本研究では、位相の情報を必要としていることと、ノイズ低減処理などを行うのに平均化や内挿を行っていない SAR のオリジナルの解像度と座標のままのデータが適していることから、①のレベル 1.1 データを用いる。

表 2-2 本論文で使用した ALOS-2 データおよび対応する参照用の国土地理院データ

災害	番号	ALOS-2 観測時刻(JST)	分解能 モード	オフナディア 角(°)	パス 番号	飛行方向, 観測方向*1	偏波 数*2	参照データ 時刻(JST)	ALOS-2との 時間差(h)
平成27年9月関東・東北豪雨	1	2015/09/10 11:42	3m	35.4	18	DR	1	09/10 18:00	6.3
	2	2015/09/11 22:56	3m	35.4	119	AL	1	09/11 13:00	-9.9
	3	2015/09/12 12:23	3m	35.4	24	DL	1	09/12 15:30	3.1
	4	2015/09/13 12:43	3m	52.1	27	DL	1	09/13 10:40	-2.1
	5	2015/09/13 23:37	3m	35.4	125	AR	1	09/13 10:40	-12.9
	6	2015/09/14 11:28	3m	48.0	16	DR	1	09/14 09:30	-2.0
	7	2015/09/14 23:58	3m	53.3	128	AR	1	09/15 10:30	10.5
	8	2015/09/15 22:42	6m	48.0	117	AL	2	09/15 10:30	-12.2
	9	2015/09/16 12:20	3m	13.9	22	DL	1	09/16 10:20	-2.0
	10	2015/09/16 22:42	6m	25.0	120	AL	4	09/16 10:20	-12.4
平成28年台風第9号	11	2016/08/22 23:12	3m	29.1	121	AR	1	08/23 15:00	15.8
平成30年7月豪雨	12	2018/07/08 00:05	3m	38.2	129	AR	1	07/08 14:00	13.9
令和元年8月の前線に伴う大雨	13	2019/08/28 00:18	3m	35.4	131	AR	1	08/28 15:00	14.7
	14	2019/08/28 12:11	3m	44.7	22	DR	1	08/28 15:00	2.8
令和元年東日本台風	15	2019/10/13 11:56	3m	25.6	20	DR	1	10/13 13:00	1.1
	16	2019/10/14 12:17	3m	29.1	23	DL	1	10/14 01:00	-11.3
令和元年10月の低気圧に伴う大雨	17	2019/10/26 11:36	3m	40.6	17	DR	1	10/26 08:30	-3.1
	18	2020/07/04 13:13	3m	50.9	31	DL	1	07/04 15:00	1.8
令和2年7月豪雨	19	2020/07/05 00:34	3m	18.0	129	AR	1	07/04 15:00	-9.1
	20	2020/07/07 23:07	3m	40.6	124	AL	1	07/08 12:00	12.9

*1 A/D は昇交軌道 (Ascending) / 降交軌道 (Descending)、L/R は左観測 / 右観測を表す。

*2 偏波数 1 のデータの観測偏波は HH、偏波数 2 は HH および HV、偏波数 3 は HH、HV、VH、および VV。

2.3. 精度検証用の参照データ

本論文では、ALOS-2 により抽出した洪水域の精度を定量的に検証するため、抽出した洪水域の形状の正誤を画素単位で厳密に検証する。これには精度が高くかつ独立したデータが必要であり、本論文では国土地理院による推定浸水域図を利用した [64][65][66][67][68][69][70]。これらの浸水域図は、直下ないし斜め視の航空写真、報道されている現地状況、SNS の投稿、標高データなどから手作業で作成されているが、正確にはそれぞれの浸水域図で使用している情報源は異なる [71][72]。

これらの浸水域図そのものの精度に対する定量的な報告は少ないが、作成は国土地理院の災害対応の専門家が行っており、少なくとも SAR データによって抽出した洪水域の検証に用いるには十分な精度と考えられる。また、解像度についても規定はなく、使用されている情報源のうち国土地理院の航空写真は最高で 20cm、標高データは 5m の空間解像度を持っており、その他の情報も総合的に判断し手作業で作成していることから、浸水域図の解像度については数 m 程度と考えられる。いずれにしても ALOS-2 による洪水域抽出（元データの解像度は 3m、本研究ではノイズ削減等の観点から強度画像は 5m、干渉処理画像は 10m 程度の解像度で使用）の精度検証を行うには十分な解像度である。

表 2-2 の右 2 列に、本論文で検証に使用した浸水域図を、ALOS-2 データに対応する形で示す。ALOS-2 と国土地理院の浸水域図の観測時刻は必ずしも一致しておらず、両者の時間差が大きい場合は実際の洪水状況が異なる可能性があり、比較検証には注意を要する。また、浸水域図の調査・作成範囲は限られており、ALOS-2 の観測範囲の全てを網羅しておらず、国土地理院浸水域図に含まれていない洪水が ALOS-2 で抽出される可能性もある。また、国土地理院の浸水域図は主に河川の氾濫（外水）を対象としており、内水氾濫の多くは含まれていない。

これらのことに留意しつつ、本論文では、これらの浸水域図が正しいことを仮定して ALOS-2 による洪水抽出結果と比較して精度検証を行う。国土地理院の浸水域図は画像ではなくポリゴンデータとして提供されている場合があり、これらは ALOS-2 の画像に合うよう画像化（ラスターライズ）して用いる。このようにして作成した洪水の「正解」データを以下、参照データと呼ぶ。

2.4. 精度の検証方法

本論文では、ALOS-2 による洪水抽出結果と参照データをピクセル毎に比較し、精度を検証する。このような二値分類問題の場合、表 2-3 に示すように、正答には洪水域の正答 (TP) と非洪水域の正答 (TN) があり、誤答にも False positive (FP) すなわち本来非洪水である画素の過剰検知と、False negative (FN) すなわち本来洪水である画素の検知漏れの 2 種類がある。このような表は混同行列 (Confusion matrix) と呼ばれ、分類問題でよく用いられる。

表 2-3 洪水抽出結果の検証に用いる混同行列

抽出結果 \ 実際の状況	洪水 (Positive)	非洪水 (Negative)
洪水 (Positive)	True Positive (TP)	False Positive (FP)
非洪水 (Negative)	False Negative (FN)	True Negative (TN)

精度の定量的な評価のため、本論文では以下の精度指標を導入する。

全体正解率 (Overall Accuracy, OVA) は単純な指標で、次式のとおり全ピクセルのうち正答したピクセルの割合である。

$$OVA = \frac{Correct}{Total} \quad (2-1)$$

$$(Correct = TP + TN,$$

$$Total = TP + FP + FN + TN)$$

しかし、OVA は洪水・非洪水のサンプル数に偏りがある場合には誤解を招きやすい。例えば、画像内で洪水の割合が小さい (例えば、洪水域が全体の 5%) 場合、全てを非洪水と回答しても正解率は一見すると高い数値 (例の場合、95%) となるので注意を要する。本論文では OVA を参考として示す場合があるが、最適な閾値の決定など精度の正確な比較が必要な場合には使用しない。

Precision (適合率) は次式のとおり、抽出された洪水のうち実際に洪水であるものの割合であり、True positive ratio (TPR) とも呼ばれる。洪水域に対する提供者精度 (Producer's accuracy, PA) とも同義である。

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2-2)$$

Recall（再現率）は次式の通り、実際の洪水のうち抽出できたものの割合であり、洪水域に対する利用者精度（User's accuracy、UA）と同義である。

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2-3)$$

Precision と Recall は相反する性質を持ち、例えば検知漏れを減らそうと検知を増やせば過剰検知が増えて Precision \ll Recall となり、またその逆もあり、両者はバランスをとる必要がある。Precision と Recall の両方をバランスよく加味した精度指標として F 値（F-measure、F-Score）があり、次のように計算される。

$$F_{\text{measure}} = \frac{2Precision \cdot Recall}{Precision + Recall} \quad (2-4)$$

これは Precision と Recall の調和平均である（一般に記号 F_1 で表すが本論文では別の意味で使用するため F_{measure} を用いる）。

κ 係数（Cohen's Kappa coefficient）も合わせて使用する。これは偶然に正答する確率を排除し、前述のようなサンプル数の偏りの影響を排除したロバストな精度指標であり、分類問題で広く使われている[73]。一般的な定義はやや複雑であるが、本論文のような単純な二値分類問題では簡単に次式で求められる。

$$\kappa = \frac{Total \cdot Correct - c}{Total \cdot Total - c}, \quad (2-5)$$

$$c = (TP + FP)(TP + FN) + (FN + TN)(FP + TN)$$

気象や災害の研究においては他にも様々な精度指標が用いられる。CSI（Critical Success Index、スレッドスコアとも呼ばれる）は、極端な災害など稀に起こる事象の予測精度の評価に良く用いられ、稀な事象の場合にサンプル数が多くなる TN を(2-1)式から除外した $CSI = TP / (TP + FP + FN)$ で定義される。しかし本論文では、参照データの調査範囲内（洪水発生箇所の周辺に限られる）のみにおいて精度評価を行っており、 TN が極端に多いものではないことから、本論文では CSI は使用しなかった。なお、(2-4)式の式変形から F 値は $F_{\text{measure}} = TP / (TP + FP/2 + FN/2)$ となり CSI と定義が類似しており、両者は近い値となる。

本論文では κ 係数や F 値を主軸として用い、それら総合的指標では判断できない誤差の傾向（過剰検知傾向か、過小評価傾向か）の判断に Precision および Recall を使用する。

第3章 強度画像による非建物域（完全冠水）の洪水推定

本章の要旨

地物が水没し表面が水面となる完全冠水型の洪水は、Lバンド SAR ではやや判別しにくいことや観測事例が少ないことから、様々な観測条件による精度の違いが網羅的に検証されることがなかった。特に、ALOS-2 は特定の場所を毎日観測することができるが、既往研究ではオフナディア角などの幾何条件が特に良好な一部のデータのみが使用され、ALOS-2 の高頻度性が活かされていなかった。そこで本章では、幾何条件が理想的でないデータも含めた高頻度のデータを用いて、ALOS-2 による毎日洪水域が把握できることを実証した。テストデータとしては茨城県常総市周辺における平成 27 年関東・東北豪雨の鬼怒川の洪水を観測した ALOS-2 のデータを網羅的に用い、強度画像の閾値処理により洪水域を抽出し、国土地理院の参照データを用いて観測条件ごとに閾値の最適化と精度検証を行った。

その結果、最も洪水域の抽出に適したオフナディア角は 20–40° で $\kappa > 0.5$ の精度、オフナディア角 40–50° では $\kappa \sim 0.4$ 程度の精度。50 度を超えるオフナディア角は大幅な誤抽出の恐れがあり使用が推奨できないと結論付けられた。偏波依存性は少なく、Lバンド SAR による観測で最も一般的である HH 偏波を使えばよい。ALOS-2 の観測モードに関しては、高分解能性に優れる 3m モードの方が、低ノイズ性に優れる 6m モードよりも高精度であった。また、画像のヒストグラムを用いて閾値を自動決定する方法は、オフナディア角 20–40° の範囲であれば有効に機能する可能性があるが、それ以外では精度低下が大きく、推奨できないことが分かった。

これらの結果により、これまで知見が不足していた、ALOS-2 での洪水域の抽出に適した観測条件、オフナディア角ごとの最適な閾値および精度が明らかになった。幅広いオフナディア角のデータを使用可能であることが示されたことで、少なくとも完全冠水型の洪水について、ALOS-2 により 1 日 1 回以上の高頻度で洪水域が抽出可能であることが分かった。また、その一連の時系列データから浸水面積の変化や浸水継続日数も推定でき、浸水域のダイナミズム把握の実現可能性も示された。

3.1. データと解析手法

本章では、オフナディア角、偏波、解像度などが異なる様々な観測条件で観測が行われた平成 27 年 (2015 年) 関東・東北豪雨の ALOS-2 データを最大限に活用する。本災害は、2015 年 9 月 9 日から 11 日にかけて温帯低気圧の影響により線状降水帯が形成され、記録的な豪雨が発生したものである[74]。10 日の午前 6 時頃 (日本時間、以下同じ) に鬼怒川が越水、13 時頃には破堤し、浸水は約 1 週間続いた。使用するデータは表 2-2 の 1 から 10 であり、1 週間にわたり 1 日 1 回以上のデータがある。

図 3-1(a)に本章の解析範囲 (精度検証の対象とする範囲) を示す。解析範囲は 9 月 11 日から 16 日までの各日の参照データを足し合わせた最大範囲とした。

また図 3-1(b)には当該地域の土地被覆土地利用図を示す。本図は JAXA の高解像度土地利用土地被覆図 (HRLULC) から作成した[75]。洪水域の土地利用の大半は水田であり、建物域も含まれる。本地域の地形はほぼ平坦だが、解析範囲の南北端約 16km の間に 10m 程度の標高差があり、北から南に洪水が流下した。

1.3.1 節に述べたように建物域は洪水抽出の原理が大きく異なるため、その解析は第 4 章に譲ることとし、本章では図 3-1(a)に赤色で示す建物域 (および道路) はマスクし解析から除外した。同図に青色で示す既存水域も同様にマスクした。マスクは国土地理院の基盤地図情報基本項目データをもとに作成した。

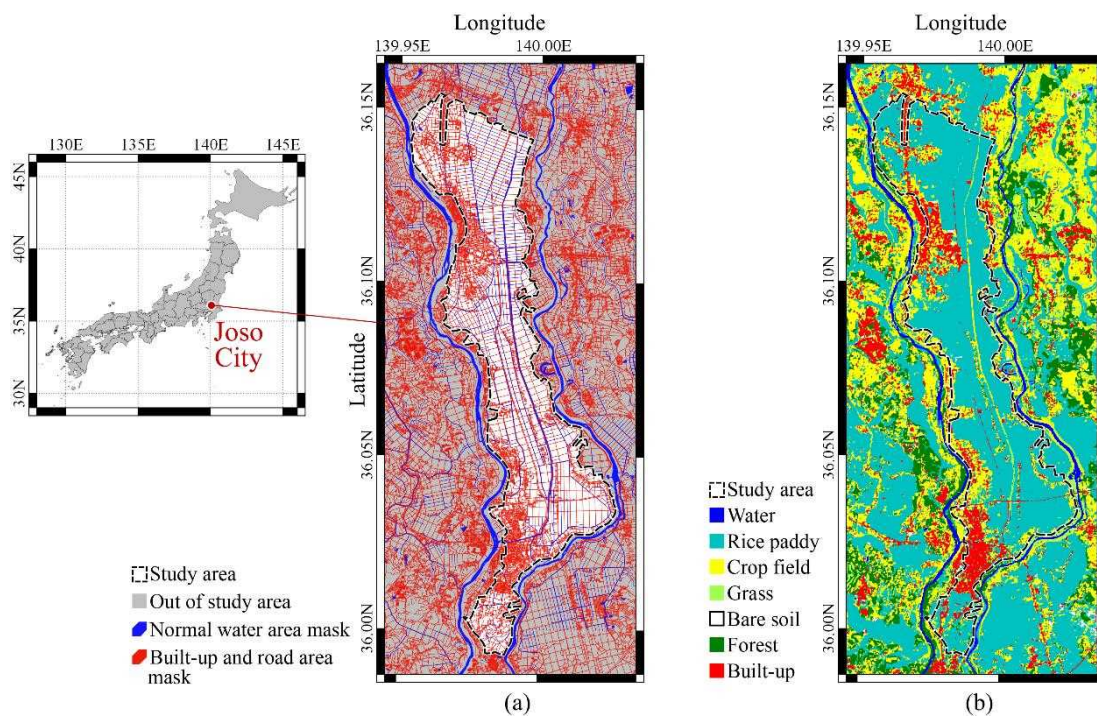


図 3-1 平成 27 年（2015 年）関東・東北豪雨の鬼怒川洪水（常総市）の解析範囲。(a)解析範囲（白）および解析に使用した既存水域マスク（青）、建物マスク（赤）。マスクは基盤地図情報（国土地理院）をもとに作成。(b)当該地域の土地被覆・土地利用図。高解像度土地利用土地被覆図（JAXA）をもとに作成）。

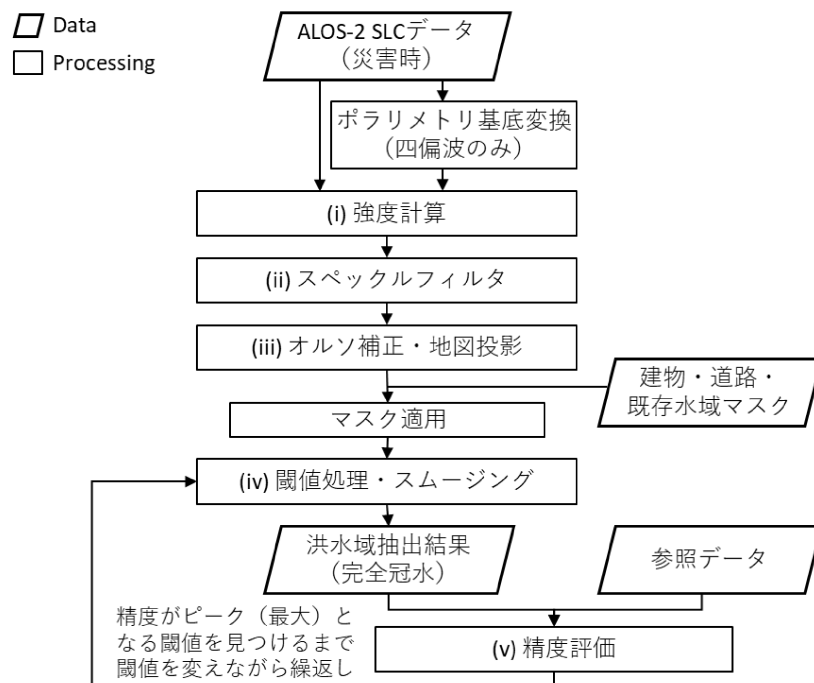


図 3-2 本章のデータ解析フロー。

本章のデータ処理のフローを図 3-2 に示し、下記で詳述する。本章で扱う完全冠水の洪水域は後方散乱強度が小さい (1.3.1 節) ことから ALOS-2 データの強度画像を閾値により二値化 (強度が閾値より小さければ洪水) するのが基本原理である。原理は比較的単純であるが、一部、スペckルノイズなど注意や工夫を要する点がある。

(i) 強度計算

本研究で入力としたデータは ALOS-2 の SLC データ (標準プロダクトレベル 1.1、詳細は 2.2 節) である。SLC は画素ごとに実部と虚部の値をもつ複素データであるが、本章の解析には強度のみが必要であり位相の情報は不要であることから、複素数の絶対値をとることにより強度に変換して用いた。また、その強度を数値で表す際には下記の規格化後方散乱断面積 σ^0 (単位 dB) に変換した。 σ^0 は、後方散乱断面積を散乱に寄与する地表面の面積で規格化した無次元の量で、分解能やレーダ送信電力が異なる衛星やモードの SAR データ間でも値を比較することが可能である。ALOS-2 データの場合、 σ^0 は次式で求められる [76]。

$$\sigma^0 = 10 \cdot \log_{10} \langle I^2 + Q^2 \rangle + CF - A \quad (3-1)$$

ここで I と Q は SLC の画素値の実部と虚部、 CF と A はそれぞれ校正係数とオフセットでそれぞれ -83.0 、 32.0 の固定値を用いる³。括弧 $\langle \rangle$ はアンサンブル平均であるが、ここでは平均を行わず 1 ルックのまま処理した。二偏波、四偏波モードのデータに対しては、この強度画像を各偏波についてそれぞれ作成可能である。表 2-2 のデータ 8 については二偏波データであり、HH と HV (HV は送信偏波が水平、受信偏波が垂直を表す。以降も同様の命名規則である)、データ 10 は四偏波データであり、HH、HV、VV の各偏波の強度画像が得られる。なお本研究で用いる ALOS-2 四偏波データの標準プロダクトは予め偏波校正がなされており [78]、相反性 (reciprocity) により VH 偏波は HV 偏波と等価と考えられるため使用しなかった。四偏波データは偏波散乱を完全に記述可能であり、観測時に使用した水平・垂直偏波だけでなく、他のあらゆる偏波のデータを数学的に再現可能である (詳細は付章 A に述べる)。ここでは、HH+VV、HH-VV 偏波 (それぞれ表面散乱、二回散乱に概ね対応)、LL、RR 偏波 (L/R は右/左円偏波の意) のデータも比較の対象とし、それぞれについて強度画像を作成した。

(ii) スペckルフィルタ

一般的な光学センサでは、自然光を観測するため観測される位相はランダムであり、それ

³ CF は本来、この値を変えることにより強度を校正する役割を持つが、現状の ALOS-2 プロダクトは (最新のバージョンのプロダクトを使用する限り) 常に -83 の固定値を使えばよいようにプロダクトの画素値が予め校正されている [77]。よって、それ以上の校正は不要であり、固定値を用いればよい。

らの電磁波同士が干渉することはない。一方で SAR は周波数や位相の揃った信号を用いるコヒーレントな観測方式であるため、1つの分解能幅の中に含まれる地上の多くの散乱体からの散乱波（位相や強度が異なる複素数）が加算されることで、信号値がランダムに変化する。これは画像にごま塩状のスペックルノイズとして現れ、SAR の原理上避けることができない。またスペックルノイズは強度に比例して増加する乗法性雑音であり、レーダの送信電力を上げてもノイズは低減できない⁴。

Lバンド SAR データは洪水域と非洪水域の強度差がもともと小さく、スペックルノイズにより強度の値にばらつきが大きいことは致命的である。この対策として強度画像にスペックルノイズ削減フィルタを適用し、画像処理によるノイズ低減を行った。単純な平均化では解像度が低下し画像のエッジや点像が曖昧になるため、Lee フィルタ[79]や Frost フィルタ[80]などのエッジや点を保存する適応型のフィルタを用いた。また、フィルタのウィンドウサイズは5×5ピクセルと7×7ピクセルを試行した。

(iii) オルソ補正・地図投影

ここまでの画像はレーダ座標系であり、地図や他の地図情報と重ねて利用できるようオルソ補正および地図投影を行った。座標系はユニバーサル横メルカトル法 (UTM) の 54 系 (北半球)、解像度は 5m とした。UTM は、経度帯ごとに定義された、地表に非常に近い円筒面に地図投影を行っているため、ALOS-2 画像のような小領域の画像に対して用いれば、歪みが非常に少なく、ピクセル数をそのまま長さや面積に変換できる (例えば国土地理院の 1/25000 地形図等でも UTM が使用されている)。オルソ化に用いた地形データ (DEM) は北海道地図株式会社で商用販売する GISMAP Terrain である。この DEM は地上レベルの高さを表すラスタデータで、建物や木の高さは排除されている。解像度は 10m、高さ精度は約 5m である。この DEM は 2.2 に述べた ALOS-2 の標準プロダクト L2.1 データで使われている DEM と同じであるため、本研究でオルソ化した強度画像の位置精度は標準プロダクトと同等の 6m 程度と考えられる[76]。本研究で用いる画像は解像度 5m であることから 1 画素分程度のずれに相当し、実用上問題ない範囲と考えられる。

(iv) 閾値処理とスムージング

本章は非建物域の洪水を対象としているため、この段階から建物はマスクし解析から除外した。洪水域は下記のように σ^0 に閾値 σ_{th}^0 を適用する (後方散乱強度が閾値より小さければ洪水とする) ことによって抽出した。

⁴送信電力を増加させてもノイズを低減できないのはあくまで乗法性雑音であるスペックルノイズについてであり、SAR システム内の熱的な雑音などは加法的雑音のため送信電力を大きくすれば S/N を向上させることができる。よって、十分な送信電力が必要であることに変わりはない。

$$\begin{aligned} \text{Flood: } \sigma^0 &< \sigma_{\text{th}}^0, \\ \text{Non-flood: } \sigma^0 &\geq \sigma_{\text{th}}^0 \end{aligned} \tag{3-2}$$

このようにして得られた洪水域は、二値化画像の性質としてごま塩状の微小なノイズを多く含むため、画像中の図形の膨張・収縮などの形状変化を行うモルフォロジ演算（形状解析）によってこれらを低減する[81]。基本的なモルフォロジ演算として洪水域を周辺の画素に拡張する膨張処理（Dilation）、および、逆に非洪水域を周辺の画素に拡張することで洪水域を縮小する収縮処理（Erosion）がある。これらは、注目画素の画素値を、周囲の画素を含むウィンドウ内の最大画素値または最小画素値で置き換える演算により実現される。これらはどちらか一方のみを過剰に適用すると、洪水域が一方向的に増大・減少するため、収縮処理の後に同じウィンドウサイズで膨張処理を行う Opening 処理や、逆に膨張処理の後に縮小処理を行う Closing 処理が有効であり、本研究では両者を試行した。

(v) 精度評価

最後に参照データとの比較により精度を検証した（検証方法は 2.4 節）。主として用いる精度基準は κ 係数とし、参考として全体精度 OVA は示す。

本研究では以上の処理を、閾値を変えながら繰り返し行い、精度（ κ 係数）がピーク（最大）となるような最適閾値 $\sigma_{\text{th_opt}}^0$ を見出した。

これらの処理は表 2-2 の 1 から 3 のデータについては行わなかった。データ 1 は洪水域が急激に変化している時間帯であり、ALOS-2 と参照データの観測時間差により状況の違いが著しく、比較検証が困難である。すなわち、ALOS-2 観測は越水時（破堤前、12 時頃）であったが、参照データは破堤後に急速に浸水範囲が広がった後（18 時頃）であり、状況が異なる。データ 2 は精度検証範囲の中で洪水域が大半を占めており洪水・非洪水域のバランスがとれた検証が難しいこと、3 については参照データが常総市の南部のみで北部の調査が行われていないことがそれぞれ理由である。よって、閾値を変えて処理を繰り返し最適な閾値を反復処理については、データ 4-10 の 7 データについて行う。なお、3.3.3 節の時系列変化の考察にはデータ 1、2、3 による抽出結果も用いる。その際の閾値はオフナディア角が同じであるデータ 5 で得られた閾値を流用する。

3.2. 結果

3.2.1. スペックルフィルタの効果

最初に、本解析手法の妥当性について、観測条件が良く水域も一定の広がりがあり検証しやすい9月13日夜のデータ（表 2-2 のデータ 5）を例として、手順ごとに確認する。

まずスペックルフィルタについては、図 3-3 にフィルタ適用前、および Lee フィルタ、Frost フィルタ適用時の強度画像の比較を示す。図中の農地（冠水および非冠水）では、スペックルノイズの影響によりごま塩状のノイズがあり画素値が一様でないが、特に Frost フィルタを適用した場合はそれらがよく平滑化され画素値のばらつきが抑えられていた。一方で、電柱や道路標識などの点像はぼやけずに比較的よく保存されていた。

これらの異なるフィルタを用いて洪水域抽出を行った結果を表 3-1 に示す。Frost が特に高い精度を示し、5×5 ピクセルウィンドウではフィルタを使用しない場合と比べκが 0.548 から 0.583 に向上した。より大きい 7×7 ピクセルウィンドウを使用しても精度の向上はごく僅かである一方、広範囲のピクセルを平均化することによる計算量の増加と解像度の低下のデメリットが大きい。以上から総合的に Frost フィルタを 5×5 ピクセルのウィンドウで用いるのが最適と考え、以後これを用いることにした。

Frost フィルタは、平均化の際に使用する重みづけが、ウィンドウ内の中心画素からの距離に近いほど強く、またウィンドウ内の画素値の分散が小さいほど重みが分散する。よって、画素値の濃淡の差が大きい点像や地物の境界付近がぼかされにくい。

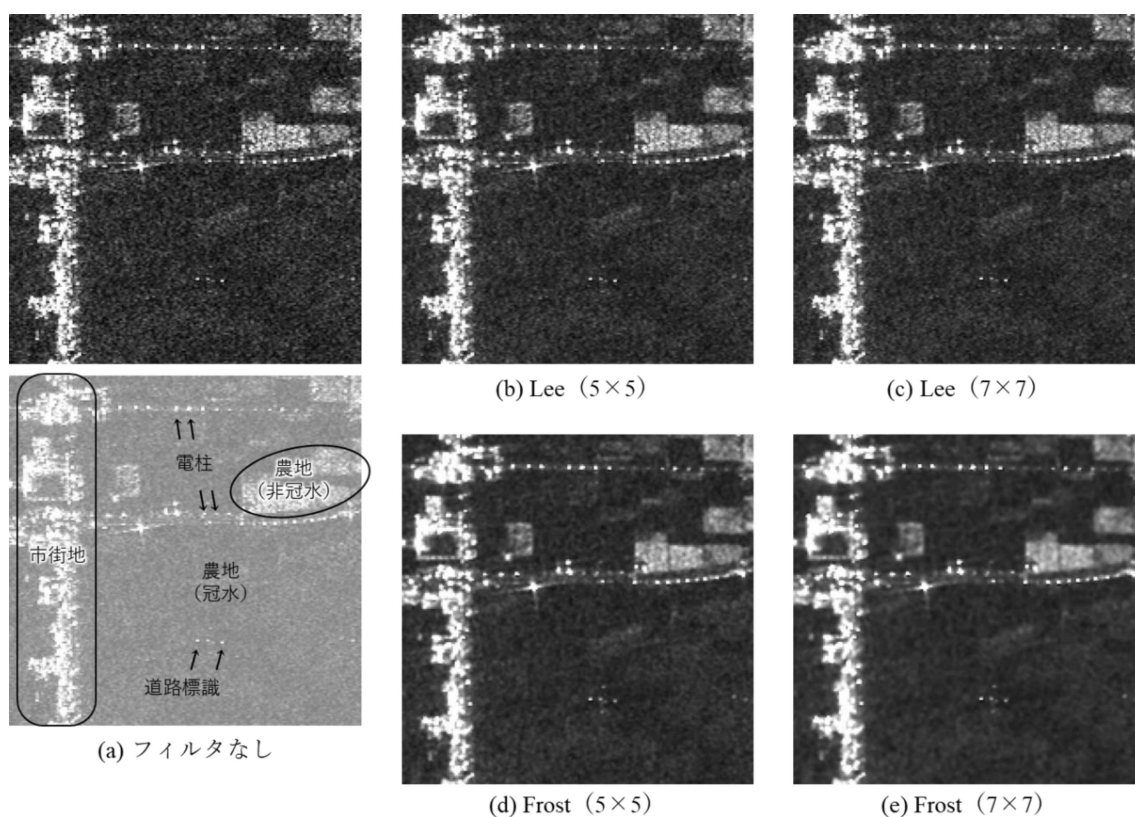


図 3-3 平成 27 年関東・東北豪雨の洪水域（常総市）の ALOS-2 強度画像（2015 年 9 月 13 日 23 時 37 分頃観測）におけるスペックルフィルタの効果の比較。

表 3-1 使用するスペックルフィルタの違いによる完全水没型の洪水抽出精度の比較（図 3-3 と同じ ALOS-2 データによる結果）

フィルタ	洪水抽出精度	
	OVA	κ
(a)フィルタなし	80.8 %	0.548
(b) Lee (5×5)	81.7 %	0.570
(c) Lee (7×7)	82.0 %	0.574
(d) Frost (5×5)	82.3 %	0.583
(e) Frost (7×7)	82.4 %	0.587

*本比較においては、モルフォロジ演算は Open (5×5) →Close (3×3) を使用。

3.2.2. モルフォロジ演算の効果

次に、水域抽出後に行う最後段の処理であるモルフォロジ演算についても同じデータ（9 月 13 日夜、データ 5）で検証した結果を示す。

図 3-4 に(a)モルフォロジ演算の適用前、(b) Closing 処理を 5×5 ピクセルウィンドウで適用した場合、(c) Closing (5×5) のあとにさらに Opening (3×3) を追加適用した場合、(d) Opening (5×5) を適用した場合、(e) Opening (5×5) のあとにさらに Closing (3×3) を追加適用した場合について、洪水抽出図の比較を示す。モルフォロジ演算の適用前(a)は、洪水域(白)、非洪水域(黒)ともに微小なノイズが多い。Closing 処理のみ適用した(b)は微小な洪水域(白いノイズ)を削減する効果があるが、洪水域内にある微小な非洪水域(黒のノイズ)は残る。逆に Opening のみを適用した(d)は微小な非洪水域は削減するが、微小な洪水域がやや残る。そこで、Closing の後にやや小さいウィンドウサイズの Opening で残った非洪水を削減する(c)か、逆に Opening の後にやや小さいウィンドウサイズの Closing で残った洪水を削減する(e)が、滑らかな洪水抽出結果を得るのには有効であった。

これらの異なるモルフォロジ演算を用いて洪水域の精度検証を行った結果が表 3-2 である。Opening と Closing の両方を用いた(c)と(e)の精度が高く、モルフォロジ演算を使用しない場合と比べ κ が 0.516 から 0.583 に向上した。(c)と(e)は Opening と Closing を適用する順番が異なるが精度はほぼ同じでありどちらを用いてもよいと考えられ、以後の解析では(e)を用いる。

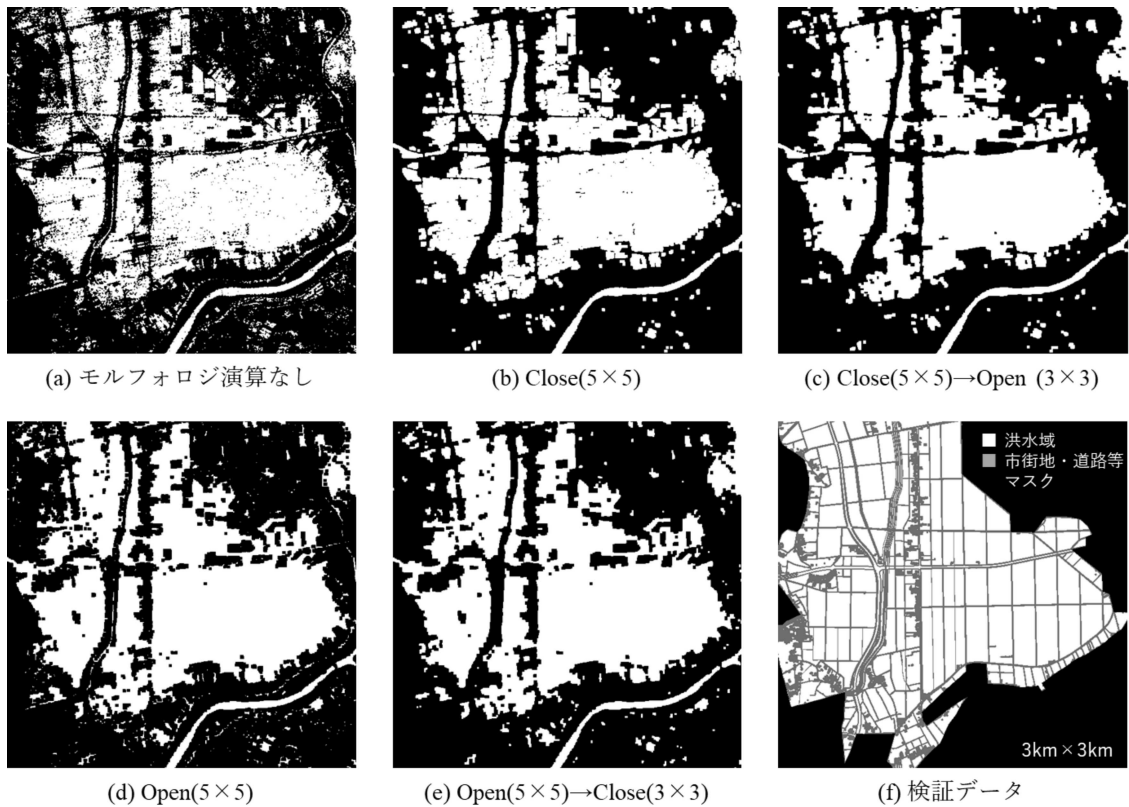


図 3-4 平成 27 年関東・東北豪雨の洪水域（常総市）の ALOS-2 強度画像（2015 年 9 月 13 日 23 時 37 分頃観測）による完全水没型の洪水抽出結果における、モルフォロジ演算の効果の比較。(e)は推定浸水域図（国土地理院）に基づく参照データ。

表 3-2 使用するモルフォロジ演算の違いによる完全水没型の洪水抽出精度の比較（図 3-4 の各抽出結果による検証）

フィルタ	洪水抽出精度	
	OVA	κ
(a) モルフォロジ演算なし	79.2	0.516
(b) Close (5×5)	82.0	0.576
(c) Close (5×5) →Open (3×3)	82.2	0.583
(d) Open (5×5)	81.7	0.568
(e) Open (5×5) →Close (3×3)	82.3	0.583

*本比較においては、スペックルフィルタは Frost (5×5) を使用。

3.2.3. 洪水域抽出精度と観測条件の関係

本章の主要な結果である、オフナディア角による精度の違いを図 3-5 に示す。これらは、

データ 4 から 10 のそれぞれについて、後方散乱強度の閾値 σ_{th} （横軸）に対する全体精度 OVA（右縦軸）と精度 κ （左縦軸）の変化をみた結果である。なお、偏波はいずれも HH 偏波である。9 月 15 日以降のデータ ((e)以降) では、 σ_{th} が小さい領域で OVA が約 90% に収束した。これは、 σ_{th} が小さすぎるとほとんど全ての画素が非洪水と判定され、一方で 9 月 15 日以降は水が引き始めており解析エリアの 90% を非洪水が占めているため、それらが正解と判定されるためである。このことは、OVA は精度を高く見積もりやすく誤解を招きやすいことを示している。一方で、こうしたサンプル数の偏りの影響を受けにくいロバストな精度指標である κ は、いずれのデータについても特定の閾値において明確な 1 つのピークを持つ。このピーク（精度が最大）となることを最適閾値と見なす。

表 3-3 は、その他の偏波も含めた全てのデータおよび偏波について、得られた精度と最適閾値を示したものである。これらの結果から、9 月 13 日夜（データ 5）のデータが最も高精度で $\kappa=0.583$ である。オフナディア角がやや小さい 9 月 16 日昼（データ 9）や 9 月 16 日夜（データ 10）のデータも比較的高精度（ $\kappa\sim 0.5$ ）である。その他のオフナディア角の大きいデータ（データ 4、6、7、8）のデータは精度が低かった（ $\kappa<0.4$ ）。最もオフナディア角が大きかったデータ 7 は精度も最も低い結果となっている。

これらの結果に基づき、図 3-6(a)にオフナディア角と洪水抽出精度の関係を示す。20–40 度程度のオフナディア角で比較的良好な結果が出ており、それより大きいまたは小さいオフナディア角においては精度が低下する傾向にある。図 3-6(b)にはオフナディア角と最適閾値の関係を示す。HH 偏波については 30–40° で閾値がやや小さくなり、それより大きいまたは小さいオフナディア角ではやや大きい傾向がある。また HV 偏波は HH 偏波と比べ 10dB 程度低い傾向がある。

偏波に関しては、四偏波データである 9 月 16 日夜（データ 10）の結果から、HH、VV、および HH+VV 偏波の精度が高く、それらに比べ RR、LL、および HH-VV の精度は低かった。比較的精度の高かった前三者に共通して含まれる散乱特性は表面散乱であり、洪水の抽出には表面散乱が寄与していることを示す結果である。また一方で、二偏波データである 9 月 15 日夜（データ 8）では HV のほうがやや精度が高い逆の結果が得られている。

解像度の異なるモードの比較の観点では、高分解能 6m モードで取得されたデータ 8 と 10 は、高分解能 3m モードで取得されたその他のデータと比べ精度が低く、例えばほぼ同じオフナディア角である 6 と 8 でも後者（6m モード）のほうが精度が低かった。

図 3-7 は本解析で得られた ALOS-2 による洪水域（上段）を国土地理院による参照データ（下段）と比較し、概ね左から右に時系列が一致するよう並べたものである。なお、本図では二偏波のデータがある(h)データ 8 についてはより精度の高かった HV 偏波、4 偏波のデータがある(j)データ 10 も同様に最も精度高かった HH+VV 偏波のデータを使用し、その他は単偏波データであるため HH 偏波の結果である。これらの結果から、ALOS-2 により抽出

された浸水域の大きさ形状、その時系列的な変化は、参照データと概ね傾向は一致している。ただしオフナディア角が特に大きく（53.3°）精度も低かったデータ7では、解析エリアの北端付近で大幅な水域の誤抽出が見られた（図 3-7(g)中の黒丸の領域）。

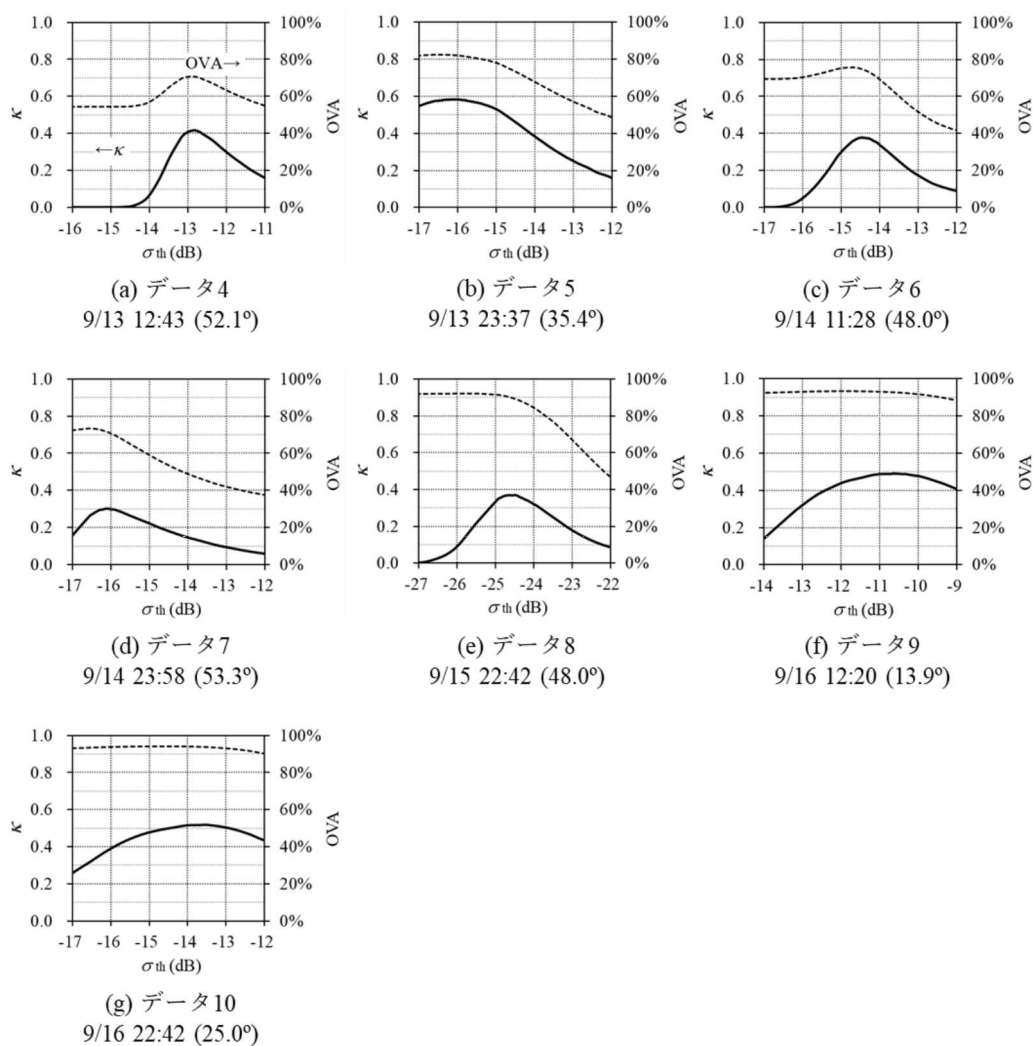


図 3-5 表 2-2 の 4 から 10 の各データについて、閾値を変えた場合の精度（OVA および κ ）の変化。括弧内の角度値はオフナディア角。偏波はいずれも HH 偏波。

表 3-3 ALOS-2 の各データ・各偏波の洪水抽出精度の比較

データ	オフナディア角(°)	偏波	精度			閾値 (dB)
			OVA(%)	Precision(%)	κ	
(a) 9/13 12:43 (データ 4)	52.1	HH	70.8	73.4	0.416	-12.8
(b) 9/13 23:37 (データ 5)	35.4	HH	82.3	71.4	0.583	-16.1
(c) 9/14 11:28 (データ 6)	48.0	HH	74.8	50.9	0.378	-14.4
(d) 9/14 23:58 (データ 7)	53.3	HH	71.8	43.3	0.280	-16.4
(e) 9/15 22:42 (データ 8)	48.0	HH	88.9	43.8	0.323	-17.9
		HV	89.6	48.9	0.370	-24.5
(f) 9/16 12:30 (データ 9)	13.9	HH	92.8	51.0	0.489	-10.7
(g) 9/16 22:42 (データ 10)	25.0	HH	93.7	44.4	0.495	-14.1
		HV	92.9	46.1	0.468	-23.4
		VV	93.7	46.8	0.508	-15.4
		HH+VV	91.8	34.8	0.358	-16.8
		HH+VV	93.9	47.0	0.518	-13.6
		LL	92.6	38.2	0.409	-18.1
		RR	92.3	39.4	0.406	-18.1
Total amp.			93.8	47.9	0.518	-20.5

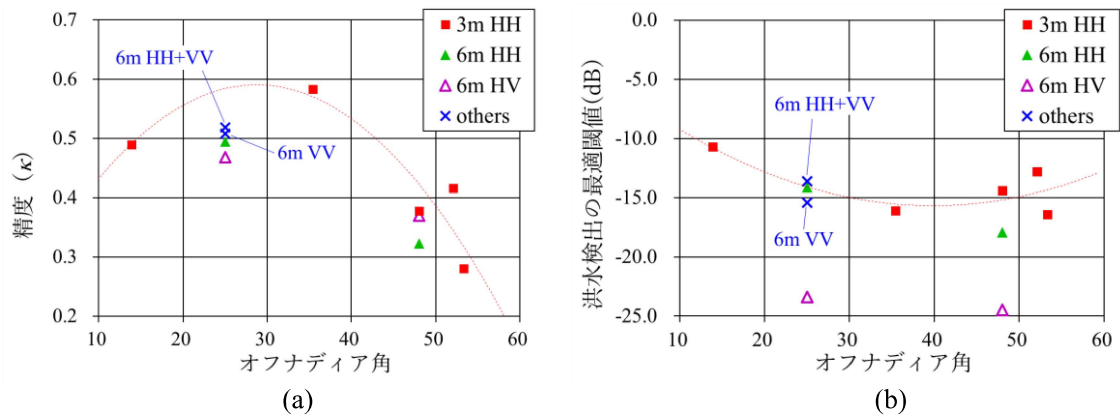
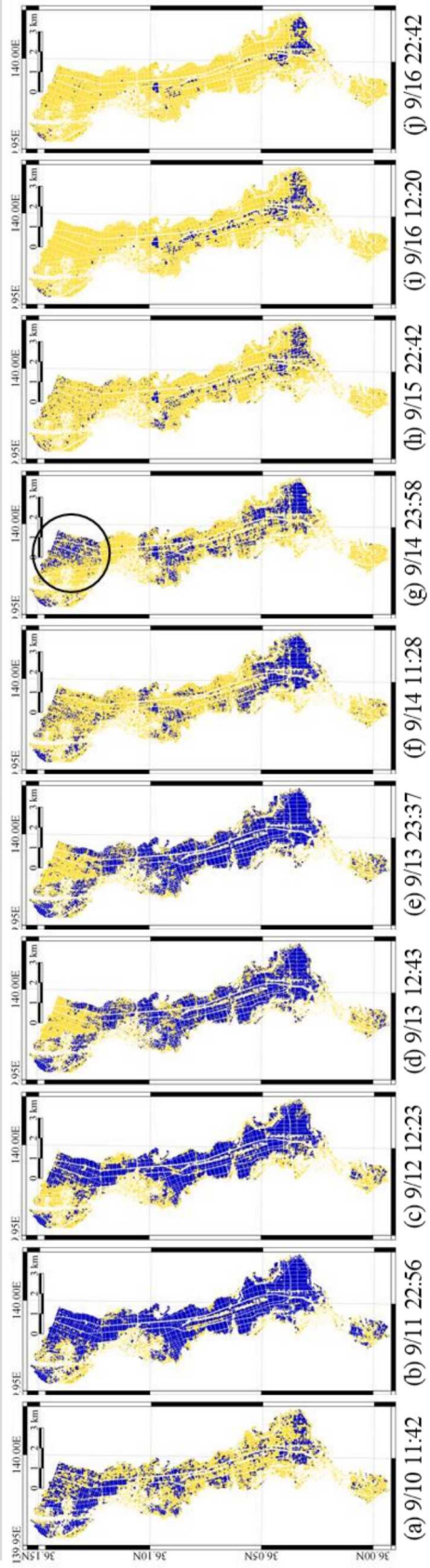


図 3-6 (a)ALOS-2 により抽出した完全水没型の洪水の精度 (κ) とオフナディア角の関係、(b)最適閾値 (dB) とオフナディア角の関係。近似曲線は 3m 解像度 HH 偏波について示す。

ALOS-2 抽出結果



参照データ

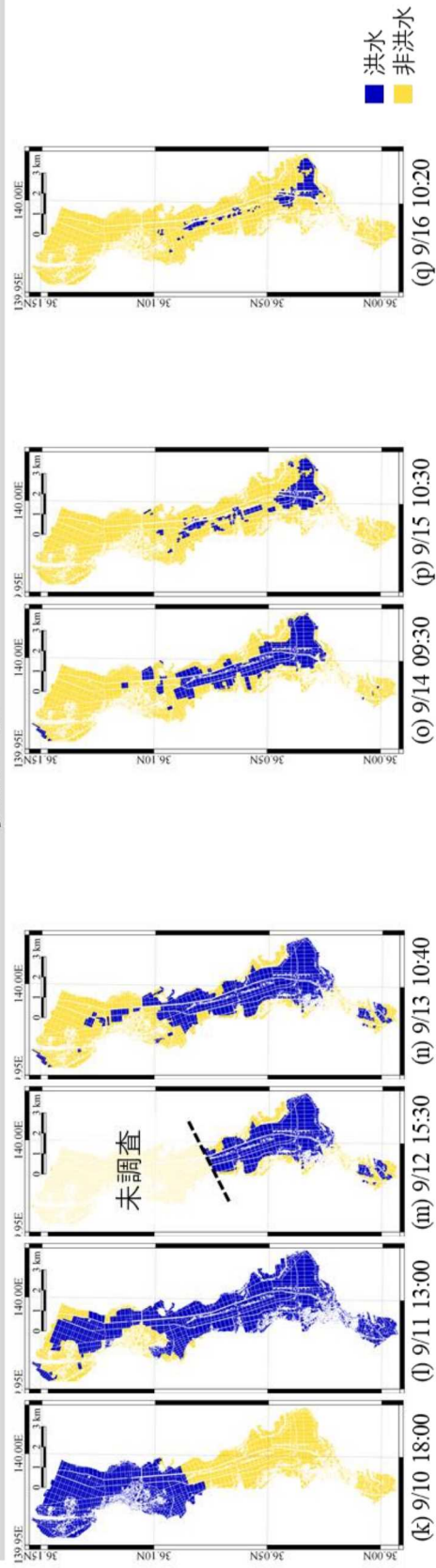


図 3-7 平成 27 年関東・東北豪雨の洪水域（常総市）の各 ALOS-2 強度画像により得られた完全冠水型の洪水域の時系列変化（上段）、および比較として国土地理院による参照データ（下段）。ALOS-2 の使用偏波は(h)は HV、(i)は HH+VV、その他は HH。

3.3. 考察

3.3.1. 洪水抽出に適した観測条件

以上の結果から、洪水抽出に適した観測条件について考察する。

これまでの結果で得られたオフナディア角と精度の関係から、オフナディア角に関しては 20-40 度程度が有効であり、小さすぎるまたは大きすぎる入射角では精度が低下する。特に 50 度を超える大きいオフナディア角においては、1.3.2 節に示したように非洪水でも後方散乱係数が小さく洪水との識別が難しい。例えば ALOS-2 高分解能 3m モードの雑音等価後方散乱係数 (NESZ、ノイズレベルに相当) の仕様値は約 -25dB であり、これを下回る後方散乱係数はノイズに埋もれる可能性が高いが、オフナディア角が 50 度以上のデータでは大半の農地や洪水域がこれを下回っている。さらに、大きいオフナディア角においては、衛星-地上間のレンジ距離が長い観測になることから受信信号の強度が低いため S/N が悪化し、ノイズレベル自体が上昇していることも精度低下の原因となる。実際に図 3-7(g) のデータ 7 に見られた著しい誤抽出域は、図 3-1 の土地利用図によれば水田である。この観測日において水田は冠水期ではないが、表面の粗度が少ない裸地の状態であるため後方散乱係数が NESZ と同等以下となり、水域と誤判定されたと説明できる。この結果から、50 度を超える極端に大きいオフナディア角は ALOS-2 による洪水把握においては避けるべきであることが分かる。

偏波に関しては、四偏波観測のデータ 10 では HH、VV、および HH+VV 偏波の精度が高く、これらに共通して含まれる散乱成分は表面散乱であることから、洪水の抽出には表面散乱が寄与していると考えられる。これは、非洪水域である農地 (表面が裸地または低植生) の主要な散乱メカニズムが表面散乱であり、表面散乱で比較をすれば後方散乱の少ない水面とのコントラストが強くなるためと考えられる。ただし、二偏波観測のデータ 8 では HH よりも HV の方が精度が高い逆の結果も得られており、また HH との差はあまり大きくない。ALOS-2 の実際の運用において HH 偏波が最も観測頻度が高く、過去データとの比較も容易となることから、現実的には洪水抽出の目的では HH 偏波を使用すれば十分と考えられる。

解像度モードについては、3m の高い解像度を持つがノイズレベルがやや高い (NESZ 仕様値 -25dB) 「高分解能 3m モード」と、解像度は 6m とやや劣るがノイズレベルが低い (NESZ

仕様値-30dB) 高分解能「6m モード」のどちらが洪水抽出精度が高いのかが興味深いところであるが、結果は 3m のほうが高い精度となった。6m モードの NESZ の改善効果よりも、3m モードの高解像度性のほうが洪水検出に有利であると結論付けられる。

また、オルソ処理前の前段の処理におけるスペックルフィルタ (Frost フィルタ)、および洪水抽出後の最後段におけるモルフォロジ演算 (Opening、Closing) は、精度の向上に大きく寄与していた。SAR データには特有のスペックルノイズがあり、洪水と非洪水の画素値の差が小さい L バンド SAR データではこのノイズの影響を受けやすいことが予想されたが、本研究で導入したこの 2 段階によるノイズ削減は有効な対策であったと考えられる。

本章では洪水時に取得した単画像のみを使用しており、過去画像や、SAR 以外のデータは用いて精度を向上する余地がある。これ以外の誤差要因として、特にデータ 5、7、8、10 は ALOS-2 の観測時刻と参照データの取得時刻に 10 時間を超える時間の差があり、このデータの時間差により精度が低下する要因になっている。

3.3.2. 自動閾値推定の試行

洪水抽出の最適閾値もオフナディア角への依存性がある。図 3-6(b)に示すように、50 度を超える大きなオフナディア角では、閾値はやや高い傾向にあり、これは前節に述べたように高オフナディア角においてはノイズレベルが上昇し画素値を全体的に押し上げているためと説明できる。また 20 度を下回る小さなオフナディア角でも閾値が高く、これは水面からの後方散乱の上昇によるものである。よって、洪水の抽出に用いるべき強度画像の閾値は一定値を用いることはできず、オフナディア角に応じて異なる閾値を適切に使用しなければならないことが分かる。

これらの閾値は、洪水域の真値と仮定して用いることのできる参照データが先にあり、それと比較することで求めることができた。しかし実際の災害対応においては、昼夜天候に関わらず観測可能な SAR が最も早い速報を出すことが求められ、閾値を決めるための参照データはない。そこで、画像そのものから閾値を推定できるかを検討した。

1.3.4 節に述べたように波長の短い X バンドでは洪水・非洪水のコントラストが強いことからヒストグラムに双峰性があり、両者を分離する閾値の検出は容易である。ヒストグラムの双峰性が弱い L バンドでは困難と思われるものの、同様の手法で自動推定を試みた。SAR データの強度の分布と比較的合致するガウス分布を仮定し、分布が偏ったデータに対してもロバスタな Kittler—Illingworth の方法 (以下 KI 法) [46]を採用した。KI 法では、2つのガウス分布 (ここでは水域と非水域) からなるサンプルを与え、これらを最も少ない誤差で二分する閾値を探す。誤差の大きさの基準となる判別関数はベイズの定理から導出される下

記のようなものである。

$$J(T) = w_{\text{Flood}}(T) \log \left(\frac{s_{\text{Flood}}(T)}{w_{\text{Flood}}(T)} \right) + w_{\text{Non-flood}}(T) \log \left(\frac{s_{\text{Non-flood}}(T)}{w_{\text{Non-flood}}(T)} \right) \quad (3-3)$$

ここで、 T はある閾値、その閾値 T 以下のピクセル（洪水と見なされる）の割合と標準偏差がそれぞれ $w_{\text{Flood}}(T)$ と $s_{\text{Flood}}(T)$ 、同様に T 以上のピクセル（非洪水）の割合と標準偏差がそれぞれ $w_{\text{Non-flood}}(T)$ と $s_{\text{Non-flood}}(T)$ である。一般的には T は任意の値を初期値とし、 T を変えながら $J(T)$ が最小となるような T の値を探す。ただし本研究においては、表 3-3 の結果からどのような観測条件であっても閾値は -25dB から -10dB の間にあると考えられることから、やみくもな値を試行せず、この範囲のみを走査すればよい。

KI 法に入力するためのサンプルは、洪水と非洪水のサンプル同数与える。ここでは、既知の水域である川や池と、建物域以外の非水域から取得した合計 400 サンプルの画素値を手動で入力した。実際の自動化に当たってはサンプルの選定も含めて自動化する必要があり、地図情報や土地被覆図などを用いて、画像内の既知の水域からサンプルをとるなどの工夫が必要となる。

表 3-4 に、KI 法により自動的に求めた閾値と、その閾値を用いた場合の洪水抽出精度を示す。最適閾値を用いた場合の精度（表 3-3 と同じ）も比較のため併記した。この結果、当然ながら最適閾値よりはいずれも低い精度とはなるが、比較的小さなオフナディア角のデータについては KI 法でも比較的高い精度を出すことができた。一方で、大きなオフナディア角においてはよく機能せず、精度が低下した。これは、これまで述べたようにオフナディア角が大きいと水域と非水域のコントラストが一層弱くなり、ヒストグラムが双峰性を持たず、洪水・非洪水の弁別が困難になるためである。

図 3-8 に、各データの水域と非水域のヒストグラム（KI 法で用いたものと同じサンプルを使用して統計をとったもの）をオフナディア角の小さい順に示す。オフナディア角が小さく精度も高かったデータ 5、9、10 では明確に洪水・非洪水のヒストグラムが分かれており、2つの分布を切り分ける閾値が決定しやすかったと見られるが、その他のオフナディア角の大きなデータはヒストグラムがあまりに接近しており、これらを閾値により 2つのガウス分布に分離することが困難であったと考えられる。

以上の結果から、ALOS-2 のような L バンド SAR においては、自動閾値推定はオフナディア角が小さければ（40 度程度以下）可能であることが示唆された。しかし、大きいオフナディアでは困難であり、なるべく大きなオフナディアも使用し高頻度かつ自動的な洪水抽出を目指す第 5 章で開発するアルゴリズムにおいては、閾値は自動推定ではなく本章の結果などを参考にした経験的な閾値を用いることとする。

表 3-4 閾値を自動決定した場合の、ALOS-2 による洪水抽出精度の比較

データ	オフナディア角(°)	偏波	最適閾値		自動決定閾値	
			閾値(dB)	κ	閾値(dB)	κ
(a) 9/13 12:43 (データ 4)	52.1	HH	-12.8	0.416	-11.0	0.155
(b) 9/13 23:37 (データ 5)	35.4	HH	-16.1	0.583	-15.4	0.561
(c) 9/14 11:28 (データ 6)	48.0	HH	-14.4	0.378	-11.4	0.065
(d) 9/14 23:58 (データ 7)	53.3	HH	-16.4	0.280	-13.5	0.050
(e) 9/15 22:42 (データ 8)	48.0	HH	-17.9	0.323	-15.4	0.096
		HV	-24.5	0.370	-20.1	0.033
(f) 9/16 12:30 (データ 9)	13.9	HH	-10.7	0.489	-9.0	0.406
(g) 9/16 22:42 (データ 10)	25.0	HH	-14.1	0.495	-12.9	0.453
		HH+VV	-13.6	0.518	-12.6	0.484

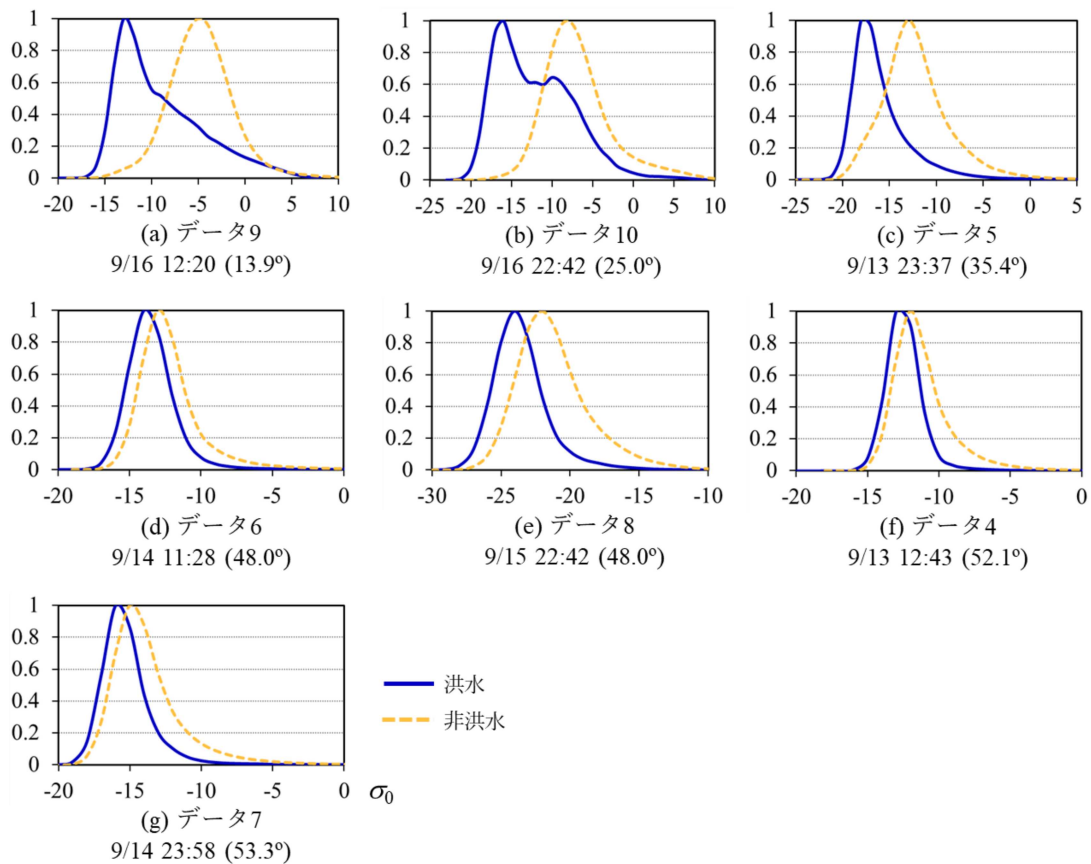


図 3-8 ALOS-2 の各データの洪水域、非洪水域のヒストグラムをオフナディア角の小さい順に示す。偏波はいずれも HH。なお、建物域の洪水は本章では解析対象外としておりヒストグラムに含まれない。

3.3.3. 時系列的な洪水域データを利用した洪水ダイナミズム把握の試行

本研究では、観測条件が最適とは言えないものも含め多くのデータを解析したことで、洪水域の変化を時系列的に把握することが可能となっている。

図 3-9 は、ALOS-2 データおよび参照データから計算された洪水域の面積を時系列でプロットしたものである（本章の解析では建物域をマスクしているため実際の洪水総面積よりは小さい数値となる）。9月11日以降においては、洪水域が自然に、およびポンプ車の排水活動により、指数関数的に減少している状況が分かる。ここには洪水抽出精度が低いデータ（オフナディア角が大きい）も含めてプロットしているが、面積としてプロットすると大きく外れる値は無い。これは、精度が低いデータにおける過剰抽出と検知漏れが面積の総計をとると相殺する傾向にあるためと思われる。すなわち、観測条件の悪いデータは、洪水域の分布としてはあまり正しく捉えられないが、面積の把握にはある程度使える可能性がある。また、図 3-9 において国土地理院の参照データ（赤色）は航空機観測や現地観測が可能な日中しかないものの、夜間の観測が可能な ALOS-2 は参照データにない夜間の情報を埋めていることが分かる。

図 3-9 において赤色で示した点線は、9月11日以降の ALOS-2（9月13日 12:43 の外れ値を除く）の抽出結果のプロットから指数減衰曲線にフィッティングしたもの（ALOS-2 データのみからフィッティングしたものであり、参照データは用いていない）であり、およそ 2.4 日の時定数で洪水域が減少していることが分かる（およそ 2 日で浸水域が半分となる）。このフィッティングは予測にも用いることができる。例えば、ALOS-2 データでは、9月10日の昼の観測から9月11日の夜の観測まで約1日半の観測のギャップがある（本来ここにも観測機会があったが衛星側の都合で観測が行われなかったものである）が、指数曲線を外挿することにより、観測が行われていない11日昼頃（洪水のピークと思われる時間帯）の浸水面積を予想することが可能であり、それは国土地理院の参照データの値よりやや過大評価となったがほぼ近い値となる（図 3-9 中の黒丸）。このように、ALOS-2 による洪水域データを時系列的に解析することにより、実際には観測が行われていない時間の状況をある程度予測できる。これらのことから、ALOS-2 の時系列データを用いて浸水面積の変化を把握し、時間的な補間・補外ができる可能性が示された。ただし、災害事例や観測条件によって面積の推定精度にはばらつきがあると考えられ、他の事例一般に適用できるかはさらなる検討が必要である。

また、洪水による家屋や資産等の被害を把握するにあたり、長時間浸水するほど被害は大きくなることから、浸水時間（日数）も重要な情報源となる。図 3-10 は、ALOS-2 による浸水域推定図（図 3-7a-j）のうち、誤抽出の多いと思われる 14 日夜（データ 7、図 3-7g）

を除いた 9 枚の時系列画像を用いて、最初と最後に洪水域が出現する画像の観測時刻の差をとることにより、浸水継続時間（単位：日）を推定したものである。時系列画像をそのまま用いた(a)は、国土地理院の推定洪水域を基に作成した参照データ(c)と比較し、傾向は一致している箇所が多いものの、やや過大推定となっている。これは元となる ALOS-2 による洪水域推定の過剰抽出によるもので、最初と最後に洪水が出現する画像の時刻を基にしていることから、時系列画像に 1 つでも過剰推定があれば浸水継続時間が大幅に過大評価されうる。そこで、時系列画像に対し、時間的なフィルタ処理を行った。すなわち、注目画素の前後の画像を含めた 3 つの画素値の多数決をとるフィルタを適用した。これにより、特定の日時の画像に誤抽出があっても、前後の画像の同じ場所で洪水が抽出されていなければ、誤抽出として除去される。この時間フィルタを使用して浸水継続時間を推定したものが図 3-10(b)である。時間方向のフィルタを適用したことにより、赤い円で示した領域など、一部で過大推定が軽減されている。

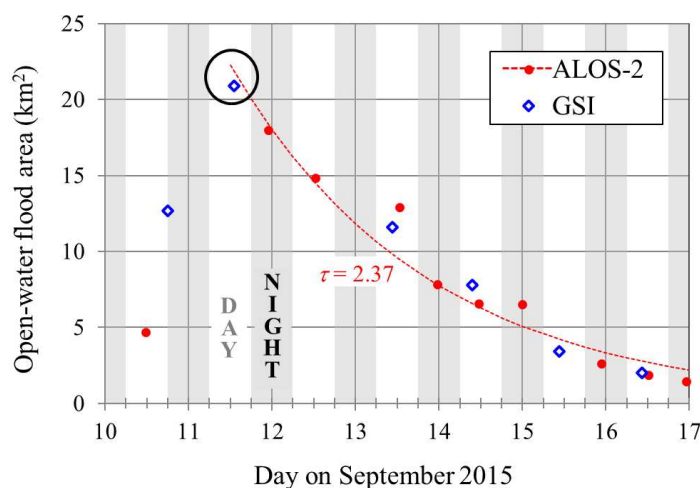


図 3-9 ALOS-2 データにより抽出した洪水域（赤）と、推定浸水域図（国土地理院）を基にした参照データ（青）により得られた洪水面積の時系列変化。減衰曲線（赤）は ALOS-2 データ（9 月 13 日 12:43 の外れ値および 9/10 のデータを除く）を指数減衰曲線にフィッティングしたもの。なお、建物域の洪水は本章では解析対象外としており、この面積に含まれない。

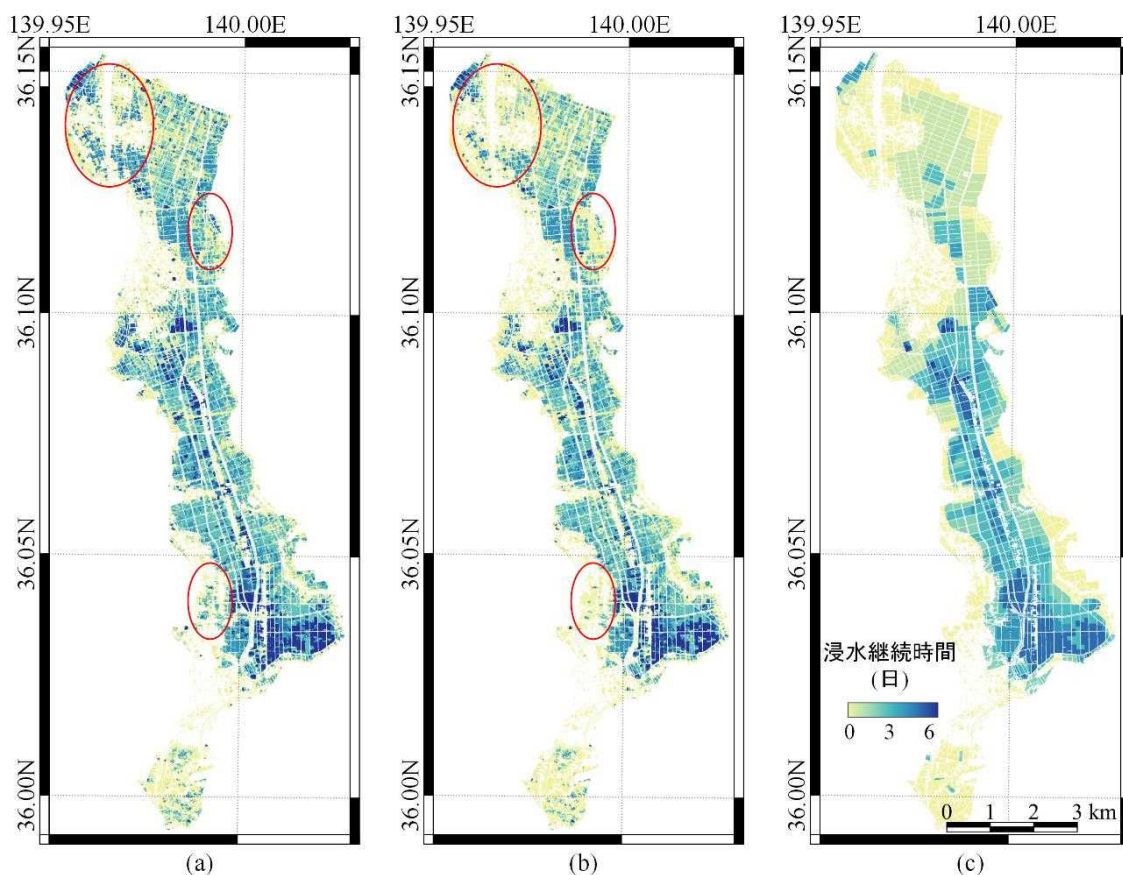


図 3-10 ALOS-2 データから推定した浸水継続時間。(a)ALOS-2 による時系列洪水抽出結果をそのまま用いて算定したもの、(b)ALOS-2 による時系列洪水抽出結果に時間方向のフィルタを適用して精度向上したもの、(c)比較として、国土地理院による推定浸水域データを基に作成した参照データ。

3.4. 本章の結論

本章では、茨城県常総市周辺における平成 27 年関東・東北豪雨の鬼怒川の洪水を観測した ALOS-2 のデータを網羅的に用いて完全冠水の洪水を強度画像の閾値処理により抽出し、国土地理院の参照データを用いて閾値の最適化と精度の検証を行った。これにより、これまで知見が不足していた、オフナディア角や偏波などの様々な異なる ALOS-2 の観測条件での最適な閾値と、ALOS-2 での洪水の観測に適した条件、およびその精度を明らかにした。具体的な観測条件は次のとおりである。

- ① 最も適したオフナディア角は 20–40° で κ 係数 0.5–0.6 (Precision で 50–70%) の精度が

ある。オフナディア角 40–50° は $\kappa \sim 0.4$ 程度 (Precision 40–50%) の精度がある。50 度を
超えるオフナディア角は大幅な誤抽出の恐れがあり使用が推奨できない。

- ② 偏波に関しては、直線偏波 (HH、VV)、パウリ成分の表面散乱 (HH+VV) 等が、洪水
抽出精度が高いと思われる。偏波依存性はあまり強くないと考えられ、ALOS-2 で平時
から最も過去データが取得されている HH 偏波を用いるのが現実的である。
- ③ 観測モードに関しては、高分解能性に優れる 3m モードの方が、低ノイズ性に優れる 6m
モードよりも、高精度である。
- ④ 以上は参照データを用いて最適な閾値を用いて得られた結果であるが、画像内の既知の
水域・非水域から取得したサンプルを用いて ALOS-2 データのみから閾値を自動決定す
る方法では、①で示した洪水抽出に最も適したオフナディア角 20–40° の範囲であれば
有効に機能する可能性がある。

以上のように様々なオフナディア角のデータを使用可能であることが示されたことで、
少なくとも完全冠水の洪水について、ALOS-2 により 1 日 1 回以上の高頻度で洪水域を抽出
可能であることが分かった。また、その一連の時系列データから浸水面積の変化を把握する
こと、それを時間的に補完・補外すること、および浸水継続日数を推定することも可能であ
り、浸水域のダイナミズムの把握にも使用できる可能性が示された。

洪水前の過去の ALOS-2 データの利用や、SAR 以外のデータの複合利用は本章において
扱っておらず、第 5 章において導入する。本章で扱わなかった建物の洪水は第 4 章で扱い、
第 5 章にも取り入れる。本研究では昼 12 時および夜 12 時に観測を行う ALOS-2 のみを使用
しているが、6 時・18 時の軌道を周回している海外などの SAR 衛星を併用すると異なる
時間帯にも観測できさらに高頻度化すると考えられる。また、時系列解析について本研究で
は全体の面積値のみ時間補完できることを示したが、浸水域の形状も含めて時間補完する
ことについては将来課題である。

第4章 干渉処理画像による建物域の洪水推定

本章の要旨

建物浸水は人命や資産への被害が大きいため検出することの重要性は大きいですが、建物の向きによって変わる二回散乱の影響で従来の SAR の強度画像を用いた方法は有効ではなく、代わりに強度では捉えられない位相レベルの変化を抽出する干渉処理（インターフェロメトリ、InSAR）解析が有効と考えられる。SAR で建物の内部の浸水の有無を検知することはできないが、建物の周囲が水面で囲まれる（本研究ではこの状態を建物浸水と定義することにより建物からの電波散乱過程が変化することは捉えられる可能性がある。例えば、平時は地面と壁の二回反射であったものが浸水時は水面と壁との二回反射となるなど、電波の伝搬経路が変化することから、平時は一様である干渉位相が建物浸水時には空間的にランダムになると考えられる。しかし、建物浸水の抽出のために干渉位相の乱雑さをどのように指標化すべきか、またその指標による建物浸水抽出の閾値や精度は不明で、その理論的背景となる、建物浸水に対する干渉 SAR データの振る舞いについての知見も不足していた。そこで、本章は、理論的なシミュレーションおよび平成 27 年（2015 年）関東・東北豪雨および平成 30 年（2018 年）7 月豪雨における実際の ALOS-2 による SAR 観測データを用いて干渉処理を行い、位相の乱雑さを示すコヒーレンスや位相統計量のパラメータを求め、それらの建物浸水の抽出への有効性を示すことを目的とした。

シミュレーションと実データの解析の結果は整合的であり、次のような結果が得られた。コヒーレンスと位相統計量はいずれも建物洪水の抽出に有効であるが、ポイント状ターゲット（周囲のバックグラウンドよりも+15dB 程度以上の明るさを持つ点源あるいは点源に近い建物など）ではコヒーレンスは平時比べて差異が少なく、位相統計量の方が建物浸水抽出に対して有効であることを明らかにした。本研究は従来災害抽出で良く使われてきたコヒーレンスについて、ポイント（状）ターゲットでは災害による変化が起きてもコヒーレンスが低下しにくいことに注意すべきであることを初めて示し、コヒーレンスの代わりに位相統計量を用いることで建物浸水の抽出精度を向上できることを示した。一方、位相統計量の短所は、分布状ターゲット（密集した建物）に対してはコヒーレンスよりやや抽出精度が低下する可能性がある点である。これを避けるには位相フィルタを使用すべきであるが、フィルタ処理による計算量の増加や解像度の低下に注意する必要がある。

本研究により、ALOS-2 の干渉 SAR データを用いて、コヒーレンスないし位相統計量に

より建物洪水を抽出できることが示された。これを SAR 強度画像による完全冠水（非建物洪水）と組み合わせることで、建物であるかに関わらず洪水全般を抽出することができる。

4.1. 干渉 SAR データの解析手法

本章では SAR の干渉処理（インターフェロメトリ、InSAR）データによる建物浸水抽出方法を検討するため、モンテカルロ法によるシミュレーション（4.2 節）と ALOS-2 の実データの解析（4.3 節）を行う。まずそれらに共通する InSAR 解析の方法について述べる。

SAR データは複素データであり強度と位相の情報を持つが、SAR データが持つ各画素の位相の値は、衛星と地上との距離のほか、地上の散乱体における電波の散乱経路、同画素内にある複数の散乱体同士の干渉などによって極めて乱雑に変化し、空間的にランダムなノイズのようになる。よって、単体の SAR データの位相から意味のある情報を得ることは難しい。しかし、観測位置や観測日時が異なる 2 つの SAR データの位相差を計算し、軌道間の距離や標高に依存する位相量を補正すると、地上の不変な散乱体由来する位相成分は相殺され、空間的に一様な位相が得られる。一方で、浸水により地上の電波散乱過程が変わる（例えば平時は地面と壁の 2 回反射であったものが浸水時は水面と壁との 2 回反射となり、電波の伝搬経路が変化すると、位相は空間的にランダムになる。波長の 5 から 10 分の 1（波長約 24cm の ALOS-2 の場合 2-5cm）程度の変位でも位相値は大きく変わることから、強度画像では捉えられない僅かな変化を捉えられる可能性がある。

図 4-2(b)に平成 27 年関東・東北豪雨の鬼怒川洪水（常総市）の 9 月 13 日夜のデータ（データ 5）の干渉位相を示す。(a)の洪水・非洪水の分布と比較すると、図中 A の非浸水の建物域では干渉位相は比較的一様であるのに対し、図中 B の建物浸水域ではランダムになっていることが分かる。よって、干渉位相の空間的なランダムさを指標化し、指標を基に閾値処理によって建物浸水を抽出することが有効と考えられる。なお、この図から分かるように建物域以外は洪水であるかどうかにかかわらず位相は比較的ランダムである（すなわち位相が安定しているのは、非洪水かつ建物域の場合である）。よって、建物域以外については干渉処理は有効ではなく、第 3 章で行ったように強度画像を解析すべきである。つまり、強度画像を完全冠水（非建物域の洪水）に、干渉処理画像を建物洪水に、それぞれ相補的に用いる必要がある。

本研究では、建物浸水の抽出に用いるための「干渉位相の乱雑さの指標」として下記に述べるようないくつかのパラメータを導入する。前提として、正確に位置合わせされた 2 つ（ここでは洪水前と洪水時の 2 つの時期）の SAR データ（シミュレーションでも実データ

でもよい)があるとする。それぞれのシグナル(複素数)を s_1 、 s_2 で表し、特に画素 i におけるそれらの値は $s_1^{(i)}$ 、 $s_2^{(i)}$ で表す。

コヒーレンスは、InSAR データの干渉性の代表的な指標であり、2つのシグナルを用いて次のように計算される。

$$\gamma = \frac{|\langle s_1 s_2^* \rangle|}{\sqrt{\langle s_1 s_1^* \rangle \langle s_2 s_2^* \rangle}} \quad (4-1)$$

ここで、括弧 $\langle \rangle$ はアンサンブル平均を表し、ここでは 6×6 ピクセルの平均を行う。コヒーレンスはすなわち s_1 、 s_2 の複素相関であり、0 から 1 までの値をとる無次元量である。これは2つの SAR 画像の類似性を表しているとも解釈できる。すなわち、災害前と災害時の2つのデータで変化がなく強度や位相が完全に一致していれば 1 に近づき(干渉性が高い)、浸水の影響で画像に変化があれば干渉位相がばらついて 0 に近づく(干渉性が低い)。図 4-2(d)にコヒーレンス画像の例を示す。図中 B の建物浸水域では、A の非浸水の建物域と比べコヒーレンスが低下することが期待されるが、あまり差は大きくなく、B でもある程度高いコヒーレンスが見られた。

コヒーレンスは s_1 、 s_2 の強度と位相の両方の情報を用いている。一方で、強度の情報を使用せず干渉位相だけに着目した統計量も考えられる。マルチルックした SAR データの干渉位相は2つの観測データの位相差として下記のように求められる：

$$\phi = \arg \left(\sum_{i=1}^N s_1^{(i)} s_2^{*(i)} \right) \quad (4-2)$$

ここで N はルック数である。この位相差から地震・火山活動・地盤沈下などによる地表面変位を計測することができ、それらが干渉処理の本来の代表的な応用分野であるが[82]、ここではそういった地盤そのものの変位はないものとする。また仮にそのような地盤の変位があった場合にも、多くの場合そのような変位は本計算で用いるウィンドウサイズでは一様なバイアスとして統計量をとったときには差し引かれるため影響は小さい。また、この干渉位相には軌道縞や地形縞など地表の状態の変化以外に起因する位相差[83]は含まない(あるいは既に補正されている)ものとする。また位相の計測誤差、水蒸気や電離層による位相変化、軌道縞補正に用いる軌道データや地形縞補正に用いる地形データの誤差などもここでは無視する。このマルチルック後の位相から、位相標準偏差(phase standard deviation、以下 PSD と略す)は次のように求められる。

$$PSD^2 = \langle (\phi - \langle \phi \rangle)^2 \rangle \quad (4-3)$$

PSD は ϕ のばらつきの度合いを表し、式(4-2)より、2枚の画像が類似していれば0に近づく。PSDのとりうる最大値は ϕ が $0-360^\circ$ に均等に分布した場合で、 $\pi/\sqrt{3}$ (約1.8ラジアン)となる。図4-2(e)にPSDの画像例を示す。コヒーレンスと比較すると、非浸水の建物域(A)と建物浸水域(B)の区別はやや明瞭になっている。位相(あるいは一般的な円周状のデータ)のばらつきの度合いを表す統計量は他にも様々考えられる[84]。位相ベクトル和(phase vector sum、以下PVSと略す)は、複素平面における ϕ の単位ベクトルの平均長であり、下記のように求められる。

$$PVS = |\langle \exp(j\phi) \rangle| \quad (4-4)$$

これは、式(4-1)のコヒーレンス計算において、 s_1, s_2 の強度を全て1に置き換えたものと等価であり、コヒーレンス同様に、取りうる値の範囲は0から1である。値の持つ意味もコヒーレンスと類似している。なお、このPVSを「コヒーレンス」として定義している研究もある(本研究では区別のため(4-1)をコヒーレンス、(4-4)をPVSと呼ぶ)。また、 $S=1-PVS$ として求められる S を位相分散(Phase variance)と呼び、位相のノイズの指標などとして使用している研究もある[85]。これは数値の大小を反転しただけあり、本質的な意味は同じである。

ϕ の占める値の範囲を角度で表す位相範囲(Phase Range、以下PRと略す)も用いることができる。取りうる値の範囲は0から 2π ラジアンであり、数値計算上は、ウィンドウ内の干渉位相の値をまずソートし、位相値の間隔が最も離れているところの角度 d から $PR = 2\pi - d$ と求めることができる。

PSD、PVS、PRの3つの概念図を図に示す。いずれも位相のばらつき度合いを表すことができる指標であるが、数値計算の効率の観点では、ソートアルゴリズムを動作させる必要があるPRは最も遅く、PSDとPVSが高速である。

次節以降では、シミュレーションデータおよびALOS-2の実データを用いてこれらのパラメータを計算し、建物浸水の抽出を試みる。

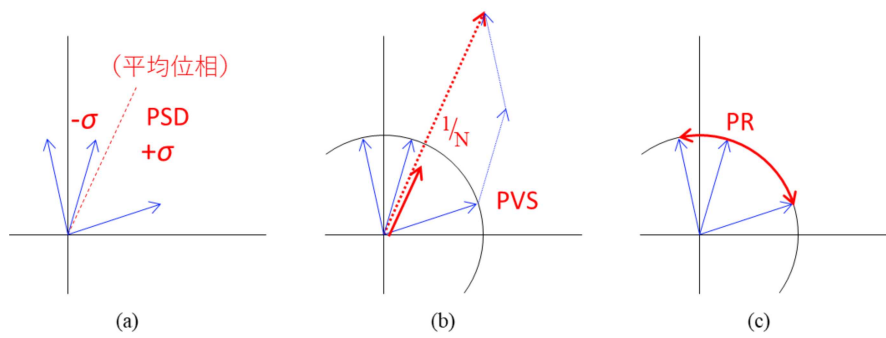


図 4-1 位相統計量の模式図。青色実線のベクトルは例として3つの位相値を表し、(a)位相標準偏差 (PSD)、(b)位相ベクトル和 (PVS)、(c)位相範囲 (PR) の計算方法を赤色で模式的に表す。

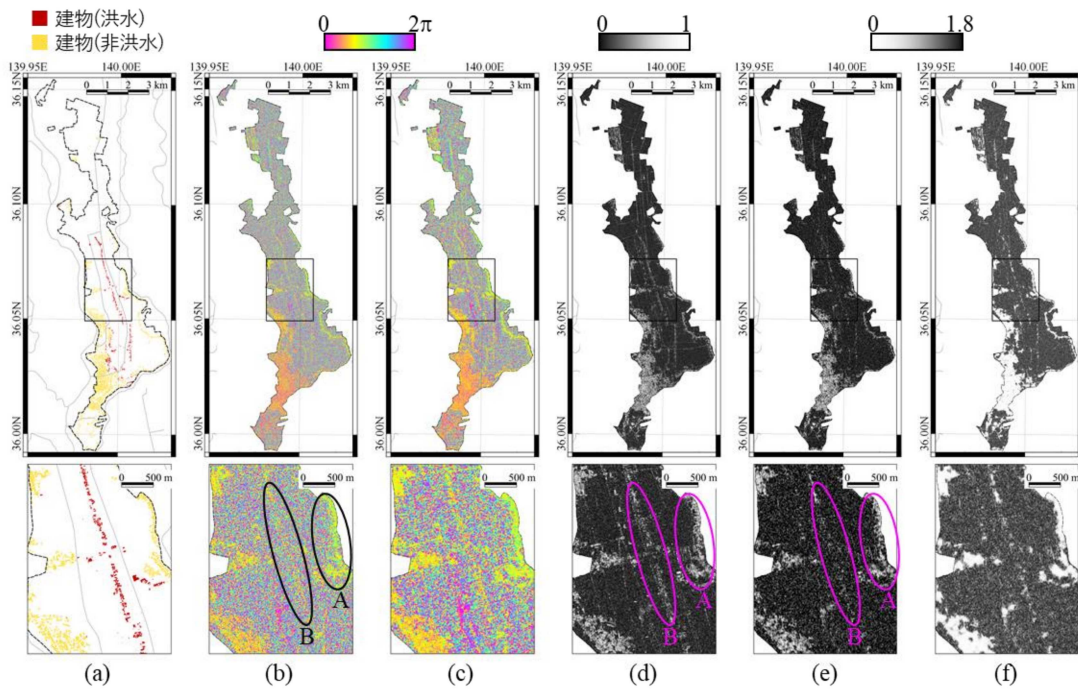


図 4-2 平成 27 年関東・東北豪雨の鬼怒川洪水 (常総市) の 9 月 13 日夜のデータ (データ 5) による干渉 SAR 解析画像の例。(a)は比較として推定浸水域図 (国土地理院) から作成した検証データによる非浸水の建物域 (黄) と建物浸水域 (赤) の区別。(b)、(c)はそれぞれ位相フィルタ使用前、使用後の干渉位相。(d)はコヒーレンス。(e)、(f)は位相フィルタ使用前、使用後の干渉位相を用いた位相標準偏差。

4.2. 建物洪水における干渉 SAR のシミュレーション

4.2.1. 分布状ターゲットの場合

4.1 に述べたコヒーレンスや位相統計量について、まずシミュレーションによってそれらの振る舞いを調べる。

まず建物密集地や森林、土壌などの分布状ターゲット（散乱体が一様に分布したエリア）についてシミュレーションを行う。このような分布状ターゲットのシミュレーションは、干渉 SAR 処理で得られる変位量の精度などを見積もる際の議論に必要であるため、よく行われてきた[83][86][87][88]。次のように 2 つの SAR データ s_1 、 s_2 を、共通したシグナル部分 c_0 と、両者の違いであるノイズ部分 n_1 、 n_2 を用いてモデル化する。

$$\begin{cases} s_1 = c_0 + n_1 \\ s_2 = c_0 + n_2 \end{cases} \quad (4-5)$$

ここで、ノイズ成分 n_1 、 n_2 は、災害に伴う変化で生じたノイズとし、災害と無関係な土地の改変などの要因は無視する。また、 c_0 および $n_{1,2}$ はいずれも、ゼロを平均とする複素ガウス分布であるとし[89]、それらの分散はそれぞれ c^2 、 n^2 とする。いま問題としているのは c と n の相対的な比率（すなわち信号対雑音比、SNR）であるため、 $c=1$ を固定値とし、シミュレーションは n の値を可変として（ n が大きいほど災害によって地表の状態が大きく変化したことを模擬している）、SNR に対するコヒーレンスや位相統計量のふるまいの変化を調べる。SAR データが複素ガウス分布に従うとすれば、このとき、 c 、 n と SNR、およびコヒーレンスの関係は次のようになる。

$$\gamma = \frac{c^2}{c^2 + n^2} = 1 / \left(1 + \frac{1}{SNR} \right) \quad (4-6)$$

シミュレーションは既往の方法[90]と同じモンテカルロ法によって行う。すなわち Box-Muller 法[91]により乱数を用いて複素ガウス分布となるような c_0 、 n_1 、 n_2 の値の組を十分な数（本研究では 10 万組）生成し、式(4-5)を用いて SAR 信号 s_1 、 s_2 の値を 10 万組生成する。これらからコヒーレンス(4-1)、PSD(4-3)を求める。

図 4-3(a)はその結果で、SNR（横軸）を変えた場合のコヒーレンス（右縦軸）および PSD（左縦軸）の変化を曲線で示している。また、図 4-3(b)はこのときのコヒーレンス（横軸）

と PSD (縦軸) の関係を示している。位相を計算する際のルック数 N については、 $N=1, 2, 4, 8, 16$ の 5 ケースを試行した。これらの曲線は、既往研究の結果とよく一致するものである (例えば[83][86][87])。特に $N=4$ のケースではコヒーレンスと PSD はほぼ線形の関係にあった。これは、分散ターゲットにおいて、特にマルチルック数が 4 の場合、コヒーレンスと PSD の振る舞いは似通っており、洪水の抽出においてはどちらを利用しても大差はないことを示唆している。

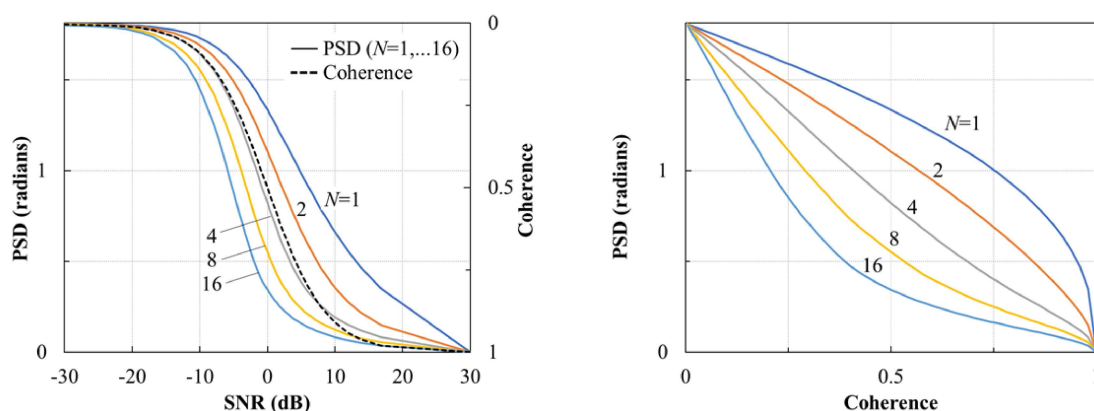


図 4-3 (a)SNR (横軸) に対するコヒーレンスおよび PSD (位相標準偏差) の変化、および(b)その際のコヒーレンスと PSD の関係。ルック数 N を変えたいくつの場合についての、分布状ターゲットに対するシミュレーション結果。

4.2.2. ポイントターゲットの場合

前述のモデルは、地上に一様に分散した散乱体をシミュレートしたもので、孤立した小さな家屋など SAR 画像で点として写るポイントターゲット的な散乱体には適用できない。そこで、本研究では前述の従来的なモデルにポイントターゲットの効果を加えたシミュレーションを行う。

式(4-5)に、コヒーレントな (すなわち、人工構造物など、安定して地表に対して変動しない、位相が安定した) ポイントターゲットの項 p_0 を次式のように追加した。

$$\begin{cases} s_1 = c_0 + n_1 + p_0 \\ s_2 = c_0 + n_2 + p_0 \end{cases} \quad (4-7)$$

ここで、 p_0 はポイントターゲットからのシグナルを表し、その位相成分は 0 とし、強度は次のような空間的な分布を示すものとする。

$$|p_0| = p \operatorname{sinc}\left(\pi \frac{x}{m_x}\right) \operatorname{sinc}\left(\pi \frac{y}{m_y}\right) \quad (4-8)$$

ここで p はこのポイントターゲットの後方散乱強度のピーク値である。 x 、 y はピクセルの画素位置を示すインデックスであり、ここでは 7×7 ピクセルのウィンドウを利用してポイントターゲットを描くこととし、 x 、 y は $[-3, -2, \dots, +3]$ の値をとる。SAR 画像においては、ポイントターゲットは1つの画素のみに点が写るものではなく、その周囲に十字（レンジおよびアジマス方向）にサイドローブを描くように結像するため、それらを再現するためにこのようなある程度のサイズのウィンドウを必要とした。 m_x と m_y は SAR の分解能（ポイントターゲットのサイズ）に対して画像がどの程度の解像度で得られているかを示すオーバーサンプル率であり、ここではいずれも ALOS-2 や一般的な合成開口レーダで用いられる典型的な値である 1.5 とする。シミュレーションは前述の分布状ターゲットと同様に $c = 1$ と固定して、 n と p を変化させて行う。すなわち、 p はバックグラウンドの平均的なシグナルの強さ c に対するポイントターゲットの相対的な強さと見なすことができる。例えば $p = 1$ (0 dB) の場合は $p = c$ であることから、バックグラウンドの信号強度と同等の強さのポイントターゲットが画像内に存在することを示す。

図 4-4 はこのシミュレーション結果を示し、 $p = 0, 10, \text{ および } 15\text{dB}$ の場合の結果を示す（マルチルック数は $N = 4$ で固定する）。前節の分布状ターゲットではコヒーレンスと PSD の振る舞いは似通っていたが、本結果では、特に p が大きくなると、コヒーレンスと位相統計量の振る舞いに乖離が生じる。すなわち、ノイズ成分が大きい場合でもコヒーレンスの値は 1 付近で高止まりしやすく、PSD と比べノイズ成分に対する感度が低くなる。この結果は、散在する家屋のようなポイントターゲットにおいては、コヒーレンスでは洪水による変化が捉えにくく、PSD のほうが適していることを示唆している。

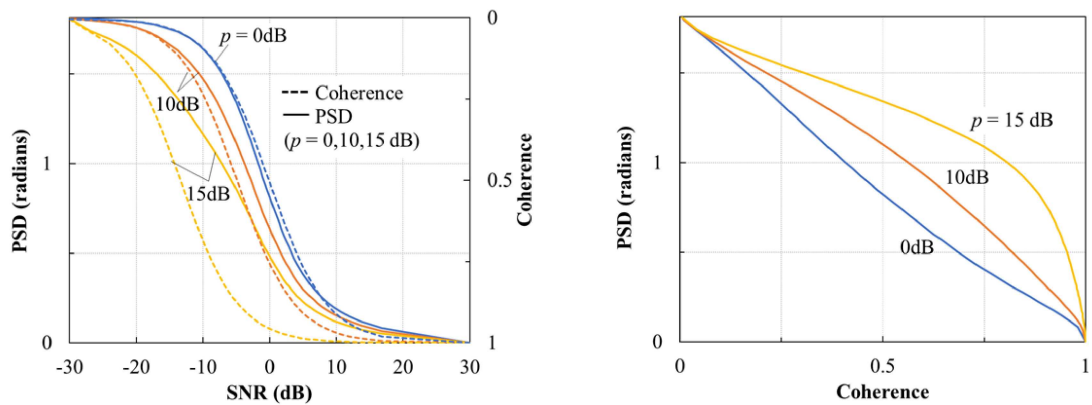


図 4-4 (a)SNR (横軸) に対するコヒーレンスおよび PSD (位相標準偏差) の変化、および(b)その際のコヒーレンスと PSD の関係。強度 p のポイントターゲットを含む場合のシミュレーション結果。ここではルック数 N は 4 とする。

4.3. ALOS-2 実データの干渉 SAR 解析

4.3.1. 使用データと解析方法

これまでの知見に基づき、実際の ALOS-2 データを用いて建物浸水が抽出できるか解析を行う。

使用するデータは、表 4-1 に示すように、第 3 章の検討で比較的条件が良いことが分かっている平成 27 年関東・東北豪雨の鬼怒川の洪水（常総市周辺）の 9 月 13 日夜のデータ（表 2-2 のデータ 5）、および平成 30 年 7 月豪雨における小田川の洪水（倉敷市周辺）の 7 月 8 日未明のデータ（データ 12）である。鬼怒川洪水（常総市）は地形が比較的平坦であるが、小田川洪水（倉敷市）は谷地形である。前者は建物が比較的孤立・分散しているエリアが多いのに対し、後者は洪水域において建物が密集した市街地となっているという違いがあるため、比較のため両者を用いる。また、干渉 SAR 解析には 2 時期のデータが必要であり、対応する過去データも使用する。使用する過去データは災害前の同じパス・モード・オフナディア角で取得された最も新しいデータを選定した。

同じ表にレンジに垂直な成分の軌道間距離 B_{\perp} も示す。この値が大きい（数 km）と干渉性に影響があるが、ALOS-2 は定められた参照軌道から半径 500 m のチューブ内に入るよう軌道維持がなされており、干渉性に影響はない。

検証に用いる参照データはこれまで同様に表 2-2 に示す国土地理院データである。

表 4-1 本章で使用した ALOS-2 データ

災害名	災害時データ	災害前データ	軌道間距離 B_{\perp}
平成 27 年関東・東北豪雨	2015/09/13 23:37 (データ 5)	2015/04/12 23:37	18.5 m
平成 30 年 7 月豪雨	2018/07/08 00:05 (データ 12)	2018/04/15 00:05	10.5 m

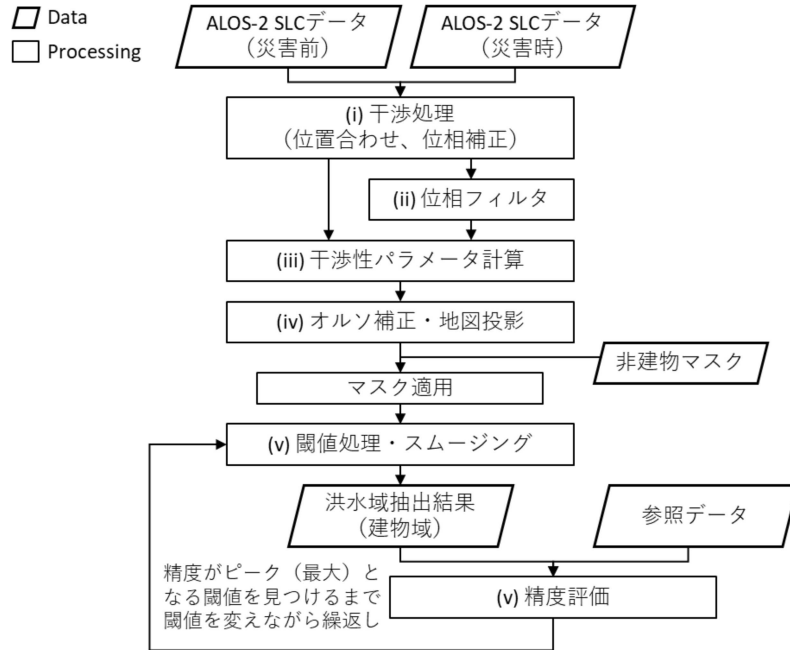


図 4-5 本章のデータ解析フロー

図 4-5 に本解析の処理フローを示し、以下に詳述する。ALOS-2 データから干渉性を表すパラメータ（コヒーレンスおよび位相統計量）を算出したあと、第 3 章の解析と同様に、閾値処理によって洪水と非洪水を弁別することを基本とし、その最適な閾値は参照データによる精度検証を反復し最適なものを調べる。

(i) 干渉処理

まず洪水時の画像を洪水前の画像に合うようにコレジストレーション（位置合わせ）し、地形縞と軌道縞が取り除かれた位相を算出する。ここまでは一般的な差分干渉 SAR の方法である。ルック数は 4.2 節の結果に基づき、位相のばらつきが効果的に抑制される 4 ルック（レンジ方向×アジマス方向に 2×2 ピクセルを平均）とする。地形縞の除去に関しては DEM を用いて標高差に起因する位相を取り除いている。DEM で表現しきれない、建物の高さに起因する位相などは理論上残存しうるが、表 4-1 に示すように垂直基線長が非常に小さいことで標高差に起因する位相も非常に小さくなるため、これは無視できる。

(ii) 位相フィルタ

干渉位相は（干渉性の高い領域でも）ある程度のノイズがあるため、自己相関フィルタ（Goldstein–Werner フィルタ、以下 GW フィルタ）[92]を用いて位相を平滑化（フィルタのパラメータを 0.8 とする）する。また比較のため、このフィルタを行わないケースも実施する。図 4-2(c)にフィルタ後の干渉位相の例を示す。同図(b)のフィルタ前の干渉位相と比較すると、低干渉域についてはあまり変わらないが、干渉性の高い非洪水の建物域については位相がより滑らかになっており、干渉性の高い非洪水と干渉性の低い洪水がより確実に識別できることが期待される。

(iii) 干渉性パラメータ（コヒーレンスおよび位相統計量）の計算

フィルタした位相（あるいはしない位相）を用いて 4.1 節に述べた 3 種類の位相統計量を 3×3 ピクセルウィンドウの移動窓で計算する。なお、これらの位相統計量は、位相画像を作成する段階で 2×2 ピクセルのマルチルック（平均化したうえでの画像の縮小）が適用されていること、そこにさらに 3×3 ピクセルウィンドウの移動窓で計算したことを考慮すると、合計で元の SLC で 6×6 ピクセル分に相当する情報が平均化され 1 画素に寄与している。

また比較として、コヒーレンスも、同じピクセル数が寄与するよう 6×6 ピクセルのウィンドウで SLC から計算する⁵。

(iv) 位相統計量とコヒーレンスの計算

求められたコヒーレンスと位相統計量をオルソ補正およびジオコードし、解像度 5m で UTM（鬼怒川洪水では 54 系、小田川洪水では 53 系）に地図投影する。

(v) 閾値処理とスムージング

これらのコヒーレンスや位相統計量画像を閾値で二値化する。次に、3.1 節の完全冠水の洪水抽出方法と同様にモルフォロジ演算を適用し、抽出結果の微細なノイズを低減する。

また、本研究は建物域のみを対象としていることから、国土地理院基盤地図情報の建物輪郭線ポリゴンデータを用いて建物以外をマスクする。

(vi) 精度評価

参照データとの比較により精度を検証した。主として用いる精度基準は κ 係数とし、全体精度 OVA は参考として示す。

本研究では以上の処理を、閾値を変えながら繰り返し行い、精度（ κ 係数）がピーク（最大）となるような最適閾値を見出した。このような教師付きアプローチでは学習用のデータと検証データを独立させることが望ましいため、この閾値決定で用いるテストデータと参照データの組（学習データ）は全ピクセルのうち 70% のサンプルとする。最終的な精度は、求められた閾値を使って残りの 30% のサンプル（検証データ）を二値化して精度検証する。

⁵ここでは SLC から直接 6×6 ウィンドウ（2 ピクセルずつ移動する移動窓で）でコヒーレンスを計算しているが、これを位相統計量と同様に SLC を 2×2 ルックでマルチルックしてから 3×3 ウィンドウの移動窓で計算しても値は同じである。

4.3.2. 結果

平成 27 年関東・東北豪雨の鬼怒川洪水（常総市）のデータでは、洪水域の建物は分散、孤立したポイント状ターゲットが多い（現実の建物は壁、窓、屋根などの複数の構造物からなる散乱体と考えられるため 4.2.2 節のシミュレーションで扱ったような理想的なポイントターゲットではないため、ここではポイント「状」ターゲットと呼ぶ）。図 4-2(d)に示すようにこれらのポイント状ターゲットではコヒーレンスが高いが、一方で図 4-2(e)位相統計量は洪水域で比較的建物がよく消失して見え、洪水の被害をよく反映していることが分かる。図 4-6 はこの常総市周辺のデータで得られた浸水建物域のマップである。特に、フィルタ済みの位相から計算された統計量ではコヒーレンスのものと比べ、誤分類が低減されていることが分かる。

表 4-2 にそれぞれのデータやパラメータについて建物洪水域の抽出精度および閾値をまとめた。常総市においては、コヒーレンスは精度が劣り ($\kappa=0.304$)、各種位相統計量のほうがよく参照データと一致している。3 種の位相統計量の中でも PVS が最も精度が高かった ($\kappa=0.416$)。位相統計量の計算に位相に GW フィルタを適用した場合にはさらに精度が高かった ($\kappa=0.535$)。一方で平成 30 年 7 月豪雨の鬼怒川洪水（倉敷市）においては、GW フィルタ不使用の位相統計量（PVS の場合 $\kappa=0.586$ ）はややコヒーレンス ($\kappa=0.609$) と比べやや悪く、従来のコヒーレンスを使ったほうがかえって高精度であった。このテストサイトでは GW フィルタは位相統計量で高い精度（PR と PVS で $\kappa=0.679$ を得るために必須であった。また、これらの差異はあまり大きくなく、コヒーレンスと位相統計量の有効性は大きく異なるものではなかった。図 4-7 に示す得られた浸水域建物マップにおいても、コヒーレンスと位相統計量で大きな違いは見られないが、フィルタ済みの位相を用いた位相統計量ではわずかに誤分類が低減されている。

これらの結果は 4.2 節のシミュレーション結果と整合している。シミュレーションは、ポイント状ターゲットにおいてはコヒーレンスの変化が小さく位相統計量のほうが効果的に建物浸水を捉えることができ、分布状ターゲットにおいてはコヒーレンスも位相統計量もほぼ同等に有効であるということを示唆している。本節の結果でも、常総市は建物が散在している箇所が多くポイント状ターゲットが多いと考えられ、コヒーレンスよりも位相統計量のほうが高精度で建物浸水を抽出できていた。倉敷市の洪水域は建物が密集しており大部分が分布状ターゲットとみなすことができ、コヒーレンスと位相統計量の結果には大差がなかった。

図 4-8 は常総市、倉敷市それぞれの解析エリアにおけるコヒーレンスと位相統計量(PSD)の散布図であり、図 4-4 のシミュレーションに基づく曲線と重ねて示している。散布図の

点の色は洪水・非洪水で分けている。倉敷市においては多くの点がシミュレーションにおける $p = 0\text{dB}$ から 10dB 程度の間分布しており、分布状ターゲットや、強度のあまり強くないポイントターゲットが多いと見なせることが分かる。一方で、常総市は分布が広く、 $p < 10\text{dB}$ の分布状ターゲットも含むもの、 $p = 15\text{dB}$ を超えた点も多く分布しておりポイント状ターゲットを多く含むことが分かる。

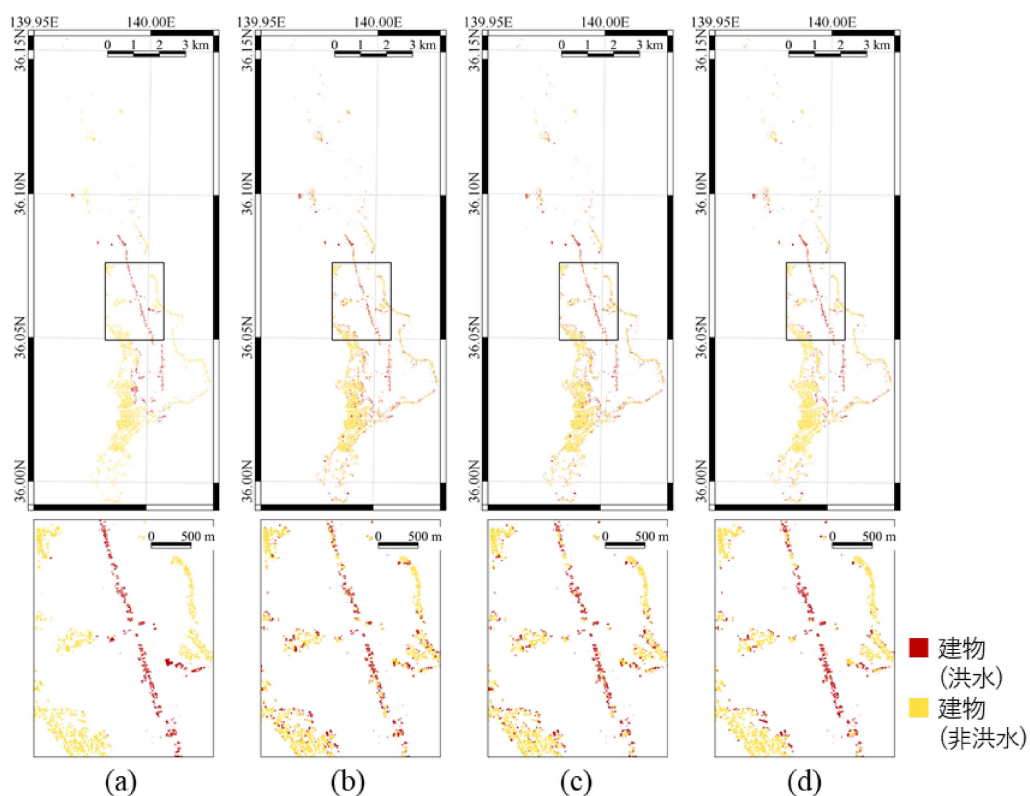


図 4-6 平成 27 年関東・東北豪雨の鬼怒川洪水（常総市）の建物洪水域の抽出結果。(a)比較として、推定浸水域図（国土地理院）を基にした参照データ、(b),(c),(d)はそれぞれ ALOS-2 のコヒーレンス、PVS（フィルタなしの位相を使用）、PVS（フィルタされた位相を使用）による抽出結果。

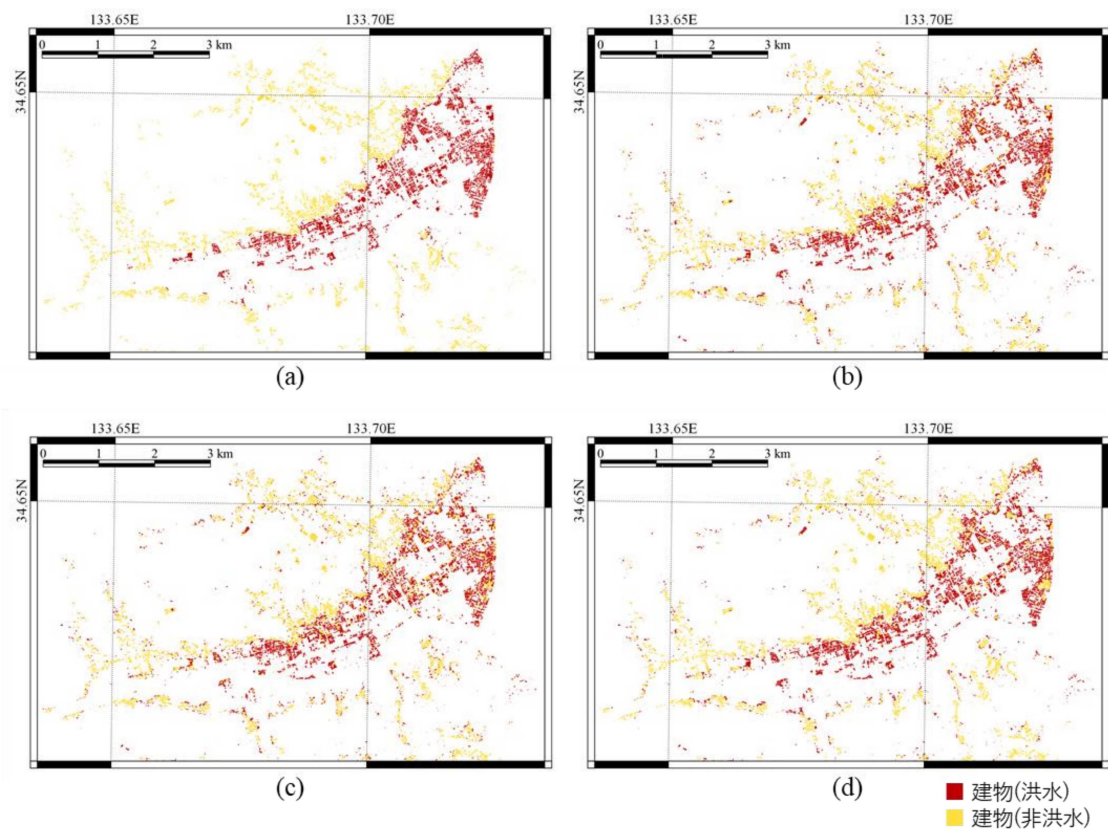


図 4-7 平成 29 年 7 月豪雨の小田川洪水（倉敷市）の建物洪水域の抽出結果。(a)比較として、推定浸水域図（国土地理院）を基にした参照データ、(b),(c),(d)はそれぞれ ALOS-2 のコヒーレンス、PVS（フィルタなしの位相を使用）、PVS（フィルタされた位相を使用）による抽出結果。

表 4-2 常総市・倉敷市の各データおよび各パラメータに対する建物洪水域の抽出精度

災害名	使用パラメータ	精度		閾値
		OVA(%)	κ	
平成 27 年関東・東北 豪雨	強度差 (二回散乱)	82.3	0.304	+1.85 dB
	コヒーレンス	80.1	0.366	0.316
	PR (フィルタなし)	81.7	0.384	239°
	PSD (フィルタなし)	83.6	0.401	78.8°
	PVS (フィルタなし)	83.4	0.416	0.371
	PR (フィルタあり)	86.2	0.535	163°
	PSD (フィルタあり)	86.4	0.535	53.6°
	PVS (フィルタあり)	86.5	0.532	0.672
平成 30 年 7 月豪雨	強度差 (二回散乱)	66.1	0.037	+1.85 dB
	コヒーレンス	81.6	0.609	0.270
	PR (フィルタなし)	78.8	0.551	240°
	PSD (フィルタなし)	80.0	0.573	78.8°
	PVS (フィルタなし)	80.8	0.586	0.352
	PR (フィルタあり)	85.0	0.679	200°
	PSD (フィルタあり)	85.0	0.678	61.9°
	PVS (フィルタあり)	85.0	0.679	0.559

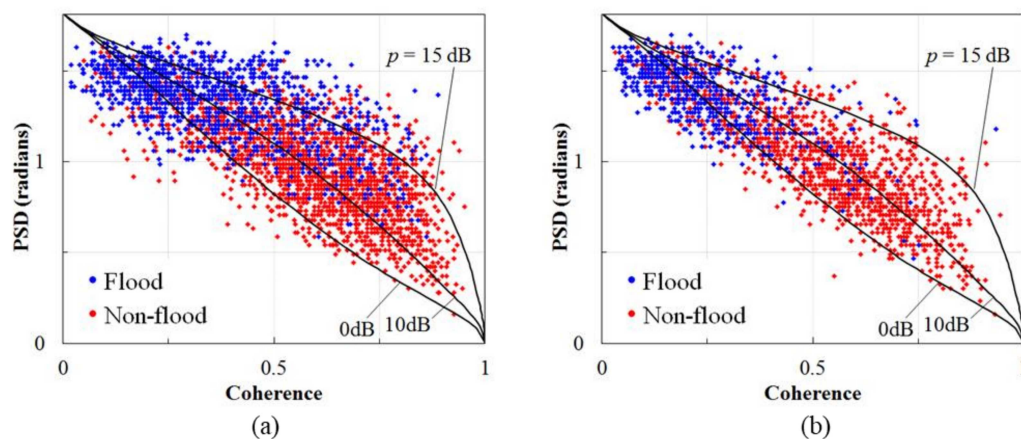


図 4-8 (a)常総市および(b)倉敷市の洪水について、コヒーレンスと PSD (位相標準偏差)の散布図。色は洪水域・非洪水の建物域の区別を表す。背景のグラフはポイントターゲットモデルによるシミュレーション結果 (図 4-4(b)より)。

4.4. 考察：シミュレーションと実データ解析結果に基づく干渉 SAR の有効性

4.4.1. コヒーレンスと位相統計量の比較

シミュレーション (4.2 節) と実際の洪水時の ALOS-2 データの解析 (4.3 節) の結果は整合している。ポイント (状) ターゲットにおけるコヒーレンスは地上で洪水などの変化があっても高い値のままになる傾向がある。コヒーレンスは洪水のみならず、地震による建物倒壊など災害における変化抽出に広く使われているが、災害箇所がポイントターゲットである場合に十分に抽出できない可能性があることについて、これまでほとんど言及されてこなかった。本研究はコヒーレンスによる災害抽出はポイントターゲットに対して注意深く使用する必要があることを示唆している。この点で、位相情報に限定した統計量は、このようなポイントターゲット場合に対しても有効である。実用面では、本研究で導入した 3 つの位相統計量のうち、計算が簡単 (比較的短時間で処理可能) な PVS が推奨される。

一方で、建物が密集している場合などポイントターゲットと見なせない場合は、コヒーレンスと位相統計量はどちらを用いても大差はなく、ノイズが比較的多い位相統計量では 4.3 節の倉敷市の洪水のようにかえって精度が落ちる可能性もある。この場合、位相フィルタを用いることが有効で、少なくとも本研究の事例においてはポイントターゲットの有無にかかわらず常にコヒーレンスより高い精度が出せるようになった。ただし、位相フィルタを用いることで空間的により平均化されているため、コヒーレンスと厳密な比較はできない。解像度の低下を避けたい場合などフィルタリングの使用が忌避される場合にはコヒーレンスが推奨される。

ポイントターゲットでコヒーレンスが強い値になりやすい原因は、強度の強い少数のピクセルがコヒーレンスの計算(4-1)において支配的になるためである。式(4-1)の計算の際、ウィンドウ内で地上の変化により位相のばらつきがあったとしても、複素平面内でのアンサンブル平均では強度 (絶対値) の低いピクセルの寄与は少なく、ポイントターゲットの強度の強い 1~2 画素程度の位相だけが反映される。このような、ポイントターゲットでコヒーレンスが強く安定する性質は、地殻や地盤変動を算出する差分干渉 SAR の研究分野では有利であり、PS-InSAR として地震、火山、地盤沈下、建物変形などによる地表面の変位量の推定で広く使われている [93]。このようにポイントターゲットにおいてコヒーレンスが強く変化しづらいことは変位量の推定には好都合であるが、一方で、コヒーレンスの低下を利用して災害を抽出したい本研究にとっては不都合であり、強度にかかわらず位相のみを用いた位相統計量のほうが有利となる。

ポイント状ターゲットに対してはコヒーレンスより位相統計量が有利であるが、建物が密集する分布状ターゲットの場合には位相統計量はコヒーレンスと同等、または4.3節の倉敷市のようにコヒーレンスよりもやや精度が低下する場合がある。4.2節のシミュレーションによれば、周辺のバックグラウンドよりも15dB程度大きいポイント状ターゲットがあれば位相統計量が有利となるようである。それより小さい場合はバックグラウンドに埋没し、全体として分布状ターゲットと見なせる。

分布状ターゲットの場合に、位相統計量がコヒーレンスと比べやや誤差を持つ理由は、SARの位相情報はばらつきが大きく、限られたサンプルでの統計量ではノイズが大きくなるためと考えられる[94][95]。大きなウィンドウサイズで位相を平均化すれば位相統計量のバイアスは改善するが、解像度を重視される建物域での災害解析には難しい。

解像度を極力維持しつつ位相の精度を高めるため、本研究ではGWフィルタを適用し、これは有効に機能した。本研究では64×64画素のGWフィルタを用いたが、このフィルタは自身のスペクトラムのべき乗を重み関数として所望の周波数成分を抽出するもので、単純に解像度が1/64に低下するものではない。被災域における位相のばらつきは維持され、一方で、位相のばらつきの少ない非災害域はより位相が平均化される。よって、解像度はある程度維持しつつ、災害域と非災害域のコントラストを強調する方向に機能する。実際に、図4-2(e)(f)に示すように被災域の輪郭は維持しながら、被災の有無が高いコントラストで抽出された。この強いコントラストは、二値化して被災域を抽出するには適している。

以上から、周辺のバックグラウンドより強い強度(15dB程度以上)を持つポイント(状)ターゲットにおいてはコヒーレンスよりも位相統計量が建物浸水抽出に有効であることが明らかとなった。一般に、ノイズに対しシグナルが15dB程度以上となったときに信頼性の高い位相情報が得られること(Rician threshold)[96]も、本研究の結果とよく整合している。

4.4.2. 強度画像による抽出の可能性

表4-2において、コヒーレンスと位相統計の比較のほか、強度画像の二回反射効果を利用した抽出も比較している。常総市の例ではある程度2回反射も有効であるが、コヒーレンス・位相統計量よりは精度が劣っていた。さらに、倉敷市の例では、二回反射ではほぼまったく抽出できない($\kappa \sim 0$)結果となった。

建物洪水時に二回反射が強くなる2つの条件として、建物の壁がレーダの方向に正対していることと、浸水が比較的浅く、反射するべき壁が十分に残っていることが必要である。常総市では、建物の向きが偶然に衛星方向に正対している地域があること、浸水深の深い地域が非建物域に限られ建物浸水深は高くないことから、この条件が満たされていた。倉敷市

では、特に建物域における浸水深が 5m 程度と深い地域が多く [97]、このことが 2 回反射の発生を妨げていたと考えられる。

これらのことから、強度画像による建物洪水の抽出は、限られた事例でのみ有効であり、本研究で目指す一般的な洪水（少なくとも日本国内のどこでも使用可能）では用いることができないと結論付けられる。

4.5. 本章の結論

本研究では、建物浸水の高精度な抽出を目指し、SAR 干渉処理で得られるコヒーレンスと位相統計量を中心に、それらの建物浸水の抽出への有効性を理論的なシミュレーションおよび実際の洪水を観測した ALOS-2 による SAR 観測データで示した。シミュレーションと実データ解析の結果はいずれも、コヒーレンスと位相統計量は建物洪水の抽出に有効であるが、やや異なる性質があることを明らかにした。ポイント状ターゲット（周囲のバックグラウンドよりも 15dB 程度以上の明るさを持つ点源あるいは点源に近い建物など）ではコヒーレンスは変化しにくく、位相統計量の方が建物浸水抽出に対して有効であった。一方で、分布状ターゲット（密集した建物やその他の地物）においては、位相統計量はややノイズが多く、建物浸水の抽出精度はコヒーレンスと同程度かやや劣る場合もあるため、常にコヒーレンスを上回る精度を出すには位相フィルタにより位相のノイズを低減させる必要があることが分かった。

なお、従来用いられてきた方法の 1 つである、2 回反射効果による強度画像の増加を用いた抽出は、建物の向きや浸水深によっては全く抽出できず、使用は推奨できないことが確認された。

本研究は従来災害抽出で良く使われてきたコヒーレンスについて、ポイント（状）ターゲットに対しては注意して使用すべきであることを初めて示し、コヒーレンスの代わりに位相統計量を用いることで精度を向上できることを示した。一方、位相統計量の短所は、分布状ターゲットに対してはコヒーレンスよりやや抽出精度が低下する可能性がある点である。これを避けるには位相フィルタを使用すべきであるが、フィルタ処理による計算量の増加や解像度の低下に注意する必要がある。今後の洪水抽出への知見として、現実的には、2 つの対策が考えられる。

- 計算量の増加や解像度の低下を許容し、位相統計量を用いて建物洪水を抽出する
- 建物洪水の抽出にはコヒーレンスを用い、抽出できないポイントターゲットについては、強度画像などを用いて周辺の洪水が抽出できていればそこから補間する

非建物・建物洪水を組み合わせ、高速で自動洪水抽出することを目指す第5章では、後者の考え方を導入する。建物がポイントターゲットであることは、周囲に建物がないことを意味しており、建物周辺の洪水については第3章に示したような完全冠水（非建物）の洪水抽出により抽出できると考えられる。そのため、コヒーレンスによる抽出漏れを周囲から補間可能である。また、このアプローチは位相フィルタによる計算量の増加や解像度の低下も防ぐことができる。なお、周辺の画素より15dB程度以上の明るさを持つターゲットがポイント（状）ターゲットと見なせることから、この閾値を用いてポイント（状）ターゲットを検出し、洪水抽出手法を自動的に切替える手法も将来的に検討の余地がある。

本研究により、ALOS-2の干渉SARデータを用いて、コヒーレンスなし位相統計量により建物洪水を抽出できることが示された。完全冠水（非建物洪水）については第3章に述べたように抽出できることから、これらを組み合わせることによって、建物であるかに関わらず洪水全般を抽出できることが示された。

本研究の残された課題は下記がある。本研究は従来災害抽出によく用いられてきたコヒーレンスを位相統計量で置き換えるものであるが、水害以外にも、地震や火災等による建物被害についても同様に従来の手法を置き換えられる可能性がある。また、本研究はALOS-2によるLバンドSARデータのみの解析であり、XおよびCバンドも含めた包括的な解析はされていない。解析の自動化や、強度画像やSAR以外のデータと組み合わせた解析については第5章に譲る。

第5章 洪水シミュレーション等を併用した自動洪水推定

本章の要旨

本章では、高分解能・高頻度の洪水域モニタリングを実現し防災・減災に資することを目的として、ALOS-2 の強度画像による完全冠水（非建物域）の洪水抽出と干渉処理画像による建物浸水抽出を統合し、全自動でロバストな洪水域抽出アルゴリズムを開発した。高速化、高精度化のために洪水シミュレーションなどの SAR 以外のデータも活用し、特に東京大学と JAXA が共同で開発し運用する Today's Earth (TE) システムで提供されている気象・河川モデルに基づく氾濫面積割合データを初めて SAR の解析に用いた。強度画像とコヒーレンス画像、それにシミュレーションというそれぞれ性質の異なるデータを融合するために、洪水抽出にはベイズ推定を用いた。精度検証は、日本国内の 7 つの水害における、観測条件などが異なる延べ 15 の ALOS-2 観測データを用いて網羅的に行った。

検証の結果、洪水シミュレーション（洪水面積割合）データは洪水抽出精度の向上に寄与しており、SAR データのみを使用している過去の研究よりも高い精度を得ることができた。ただし、精度はオフナディア角や、同観測条件の災害前アーカイブデータの量に依存していた。洪水シミュレーションは計算時間の短縮にも効果的であり、本研究で目標とした 1 時間以内を下回る 30 分以下で 1 シーン（約 50km 四方）を処理可能であった。洪水抽出精度はオフナディア角やアーカイブデータの整備状況が理想的でない場合でも 6 割、最も高かった事例で約 9 割、平均的には 7 割程度の精度が得られた。また、抽出した洪水域と標高データを組み合わせることにより、浸水深も 1m 程度の精度で推定できた。

本アルゴリズムを用いることで、ALOS-2 による最低 1 日 1 回の洪水域把握が可能となる。さらに後継機の ALOS-4 が打ち上げられ同じ軌道面内で同時に運用された場合、一日 2 回（0 時頃と 12 時頃）の洪水域把握が可能となり、この場合 2 機の衛星の位相角は約 103° が推奨される。さらに、6 時頃と 18 時頃に観測を行う他の多くの SAR 衛星を併用すれば 1 日 4 回（約 6 時間間隔）の洪水把握が可能である。

本研究で、日本域の洪水に対して ALOS-2 で 1 日 1 回以上の頻度で洪水域把握が可能となることが実証された。本研究の手法はパラメータ等の調整で ALOS-2 以外の SAR 衛星の利用や海外の洪水にも対応できる拡張性、汎用性を持っており、それらの実現が今後の課題である。また、本アルゴリズムを実用に供するため、自動処理システムに本アルゴリズムを構築し、実際の災害時に運用することも必要である。

5.1. 使用するデータ

5.1.1. ALOS-2 による SAR データ

多くの既往研究の課題として、単一の災害観測事例についてアドホック（その事例に限定した）な解析を行っており、被災状況や観測条件が異なる他のデータへも適用できる汎用性が示されていない点があった。そこで本章では 2.2 節（表 2-2）に示したほとんどのデータを用いて検証を行う。ただし、第 3 章の検討結果に基づき、平成 27 年関東・東北豪雨の鬼怒川洪水（常総市）のデータのうちデータ 1 は参照データと比較ができないため（ALOS-2 と参照データの取得時で洪水の状態が著しく異なる）、データ 4、7 は洪水抽出に適さない 50 度を超える大きなオフナディア角であるため、8、10 は洪水抽出精度が劣る 6m モードのデータであるため、それぞれ除外し、それ以外の 15 のデータを扱った。これらは、いずれも ALOS-2 の高分解能 3m モードで観測された、HH 偏波のデータである。

本章で使用するデータを表 5-1 に示す。本章では災害時のデータだけでなく、災害前のデータも使用することで事前情報なしに高い精度で洪水抽出を行う。このため表 5-1 には使用した過去データについても示す。ALOS-2 は主たる観測であるオフナディア角 29.1–38.2° の右観測では 3 か月ごとに日本全域の観測が行われ、左観測ややや大きなオフナディア角（40.6–48.0）でのベースマップも概ね 3 年ごとに取得される[24]。過去データの選定の基準は下記の通りである。

- ・ 水田の冠水など季節変化要因を確実に考慮し除外できるよう様々な季節（最大で 4 時期）の、幾何条件（オフナディア角や観測方向）や観測モードの同じ過去データを用いる。同じパスから取得したデータのため、建物浸水の抽出に適した干渉処理も可能である。
- ・ 同じパスからのデータがない場合、近いパスから取得した（オフナディア角がやや異なる）同じモードの過去データで代用する。この場合は干渉処理ができないため、建物洪水は抽出精度が低下する可能性がある。データ 9、14、17 がこれに該当する。

データ 15 については、高分解能モードでは同じパスからのデータが無いが、広域観測モード（ScanSAR）については同じパスからの過去データが存在するため、干渉処理についてのみ広域観測データで代用する。ただし広域観測データは低分解能（約 50m）であるため、データ 15 では建物洪水の抽出のみ解像度が低下する。個別の建物の浸水の有無を抽出するには解像度が不足するが、密集した建物の集合に対してある程度の抽出は可能である[43]。データ 18 は、同じパスからの過去データが 1 つあり、災害前と災害時のデータによる干渉処理は可能である。しかし、本章の自動処理では災害前の 2 つの画像による過去の干渉処理

データも必要であるため、過去分の干渉処理用にも近いパスの過去の高分解能モードデータ2つで代用した。

表 5-1 本章で使用する ALOS-2 データ

災害	災害時データ		災害前データ	
	日時	オフナ ディア角	日付*	オフナ ディア角
H27.9 関東・東北 豪雨	2015/09/11 22:56 (データ 2)	35.4°	10/23, 7/31, 2/13, 1/2	同左
	2015/09/12 12:23 (データ 3)	35.4°	2/14, 1/3	同左
	2015/09/13 23:37 (データ 5)	35.4°	12/20, 10/25, 4/12, 2/15	同左
	2015/09/14 11:28 (データ 6)	48.0°	12/7, 4/13	同左
	2015/09/16 12:30 (データ 9)	13.9°	強度画像 2/14, 1/3	35.4°
H28 台風第 9 号	2016/08/22 23:12 (データ 11)	29.1°	5/30, 2015/11/2, 2015/6/1, 2015/2/23	同左
H30.7 豪雨	2018/07/08 00:05 (データ 12)	38.2°	4/14, 3/18, 2016/12/10, 2016/7/9	同左
R1.8 の前線	2019/08/28 00:18 (データ 13)	35.4°	6/4, 2/26	同左
	2019/08/28 12:11 (データ 14)	44.7°	強度画像 2018/4/2, 2017/12/25	38.2°
R1 東日本台風	2019/10/13 11:56 (データ 15)	25.6°	強度画像 8/27	35.4°
			干渉画像 9/29, 4/14	同左
	2019/10/14 12:17 (データ 16)	29.1°	5/27	同左
R1.10 の低気圧	2019/10/26 11:36 (データ 17)	40.6°	強度画像 8/22,3/7	32.4°
R2.7 豪雨	2020/07/04 13:13 (データ 18)	50.9°	2016/4/16	同左
			干渉画像 (過去分) 6/16, 3/10	38.2°
	2020/07/05 00:34 (データ 19)	18.0°	2016/4/30, 2016/4/14	同左
	2020/07/07 23:07 (データ 20)	40.6°	2018/2/20	同左
干渉画像 (過去分) 2020/6/22, 3/16			35.4°	

*日付の年を省略したものは災害時データと同年。H27.9 関東・東北豪雨については、時期の近い災害前のデータが十分数確保できなかったため、一部は災害後の平時データで代用した。

5.1.2. TE-Japan による洪水シミュレーションデータ

本アルゴリズムでは ALOS-2 による SAR データを基軸として、TE-Japan による洪水シミュレーションデータを使用し、高精度化・高速化を図る。ここで我々の目的に合致するシミュレーションデータとは、SAR 画像と重畳しやすくするため洪水の分布や確率を面的に表したデータであること、ALOS-2 の観測時刻に合わせられるよう更新間隔の短い（数時間程度以下）データであること、緊急災害対応で使用できるようデータが（準）リアルタイムで

入手できること、SAR データと併用するために解像度が十分高いことなどである。

本研究では東京大学と JAXA が共同で開発し運用する Today's Earth システム (TE) で提供される洪水シミュレーションデータである、氾濫面積割合 (Flood fraction) データを用いることとした[98]。TE は陸域の水循環に関わる物理量を全球グリッドに対し準リアルタイムで提供している[99][100]。時空間解像度は、全球版 (TE-Global) では 0.25 度グリッド (約 25km) で 3 時間ごと、日本域版 (TE-Japan) では 1/60 度グリッド (約 1.5km) で 1 時間ごとの更新であり、本研究は日本域の洪水監視がターゲットであり、時空間分解能がより高い TE-Japan を採用した。全球規模の気象モデルや陸面モデルを基にしたデータのため空間解像度が SAR データと粗いが、定常的に提供され災害時にも入手しやすい準リアルタイムな洪水データであり、本研究の要求に概ね合致する。

TE-Japan は気象庁のメソスケールモデルによる表層気象データ (JMA-MSM) を入力とし、陸面物理過程モデルである Minimal Advanced Treatments of Surface Integration and RunOff (MATSIRO)[101][102]、河川氾濫モデルである (Catchment-based Macro-scale Floodplain model, CaMa-Flood)[103][104]を統合している。JMA-MSM による表層気象データによって制約を与え、MATSIRO が陸域と大気間の水や熱の交換をシミュレートする。MATSIRO はグリッド単位の鉛直 1 次元方向のモデルであり、水平方向の隣接するグリッドとの間の水の移動は考慮しない。CaMa-Flood は、陸面における不定形の単位流域グリッド (Unit-catchment) を単位として、隣接するグリッドとの水の移動を算出する[105]。TE-Japan ではこれをさらに緯度経度格子に変換している。流域グリッドの原初データのほうが空間解像度がやや高いが、データの扱いの平易さから本研究では TE-Japan で提供されている緯度経度格子のデータを用い、流域グリッドのデータの利用は将来課題とする。CaMa-Flood は、河川の形状を少ない数のパラメータで表現できるよう、四角形の川道と、台形の氾濫原からなる断面形状を持つ貯水槽をグリッドごとに定義している。本研究で用いる氾濫面積割合は、この単位流域グリッドの氾濫原のうち氾濫している面積の割合であり、前述の河川断面の形状とシミュレートされた河川水位から算出される。

図 5-1 に TE-Japan による洪水面積割合データの例として、2015 年 9 月 11 日 (平成 27 年 関東・東北豪雨における鬼怒川氾濫時) と、2018 年 7 月 8 日 (平成 30 年 7 月豪雨における小田川氾濫時) のデータを示す。これは SAR と比較すれば空間解像度が低く、また比較的単純な河川断面形状を仮定したモデルである。よって高分解能の洪水域抽出を目的とする本研究においては、洪水域のデータとして直接的に用いるのではなく、SAR による抽出を高精度化・高速化するための大局的で確率的な洪水可能性のマップとして用いる (詳細は 5.2.2 節に述べる)。

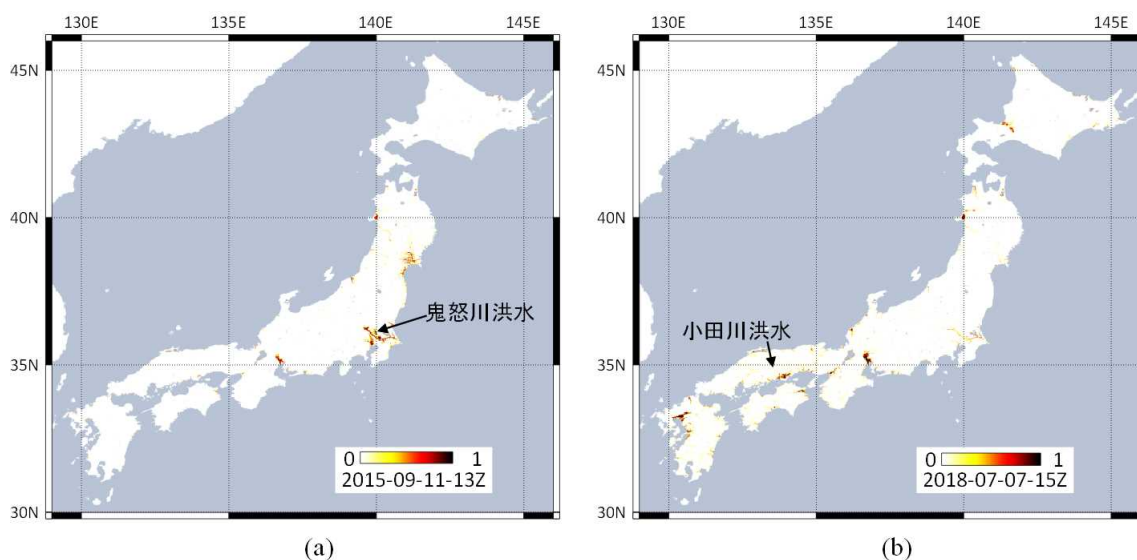


図 5-1 Today's Earth の日本域版 (TE-Japan) による洪水面積割合の例。(a)平成 27 年関東・東北豪雨の鬼怒川洪水 (2015 年 9 月 10 日)、および(b)平成 30 年 7 月豪雨の小田川洪水 (2018 年 7 月 7 日)。

5.1.3. その他の解析補助データ

その他、本アルゴリズムで補助的に使用したデータについて述べる。

土地利用土地被覆図は、特定の土地利用 (水田) で起きる誤抽出の補正 (詳細は 5.2.2 節 (ii)) のために使用した。本研究で用いたのは JAXA が処理し提供している高解像度土地利用土地被覆図 (HRLULC) バージョン 16.09 で、空間解像度が $1/3600^\circ$ (約 10m) の、日本全国の 10 カテゴリの土地被覆 (一部、土地利用) 図である [75]。解像度が SAR データと近く、高精度であり、日本全国どこでも入手できることからこれを使用した。このデータは 2006 年から 2011 年の光学衛星データを主に使用し、多数の地上検証点を用いて学習・検証されたもので、 $\kappa=0.745$ の精度を持つ。

洪水の可能性の有無を示すハザードマップも使用する。TE-Japan の空間解像度は粗く、SAR の解像度に引き伸ばして重畳するとぼやけた画像となり、不必要な領域まで洪水リスクが拡大して見える可能性がある。そこで、より高解像度な国土交通省の浸水想定区域データおよび低位地帯データを使用し、マスクを行う。ただし浸水想定区域データについては、数十年に一度級の豪雨を想定したものであり (計画規模、旧凡例)、それを上回る豪雨の際にはハザードマップを超える範囲にも洪水が生じる。また、各地域で精度や解像度などがまちまちである。よって、将来的には新たに国土交通省が整備中であるより高精度かつ前例のない規模の水害を想定した浸水想定区域 (想定最大規模、新凡例) に置き換える予定であ

る。

本研究では浸水深の推定も試行する。これには高解像度・高精度の地形データ（digital elevation model、DEM）が必要である。ここでは国土地理院の提供する基盤地図情報標高データ（5m）を使用する。本データの水平方向解像度は約 5m、高さ精度は約 30cm である。本データは山岳域などで未整備のエリアも多いが、本研究で必要となる（洪水が発生しうる）平野部のデータは網羅されていた。

精度の検証として用いる参照データは、国土地理院による推定浸水域データに基づき作成した[64]–[70]（詳細は 2.3 節に述べた）。図 5-2 に本章で処理した洪水事例を、参照データとともに示す。

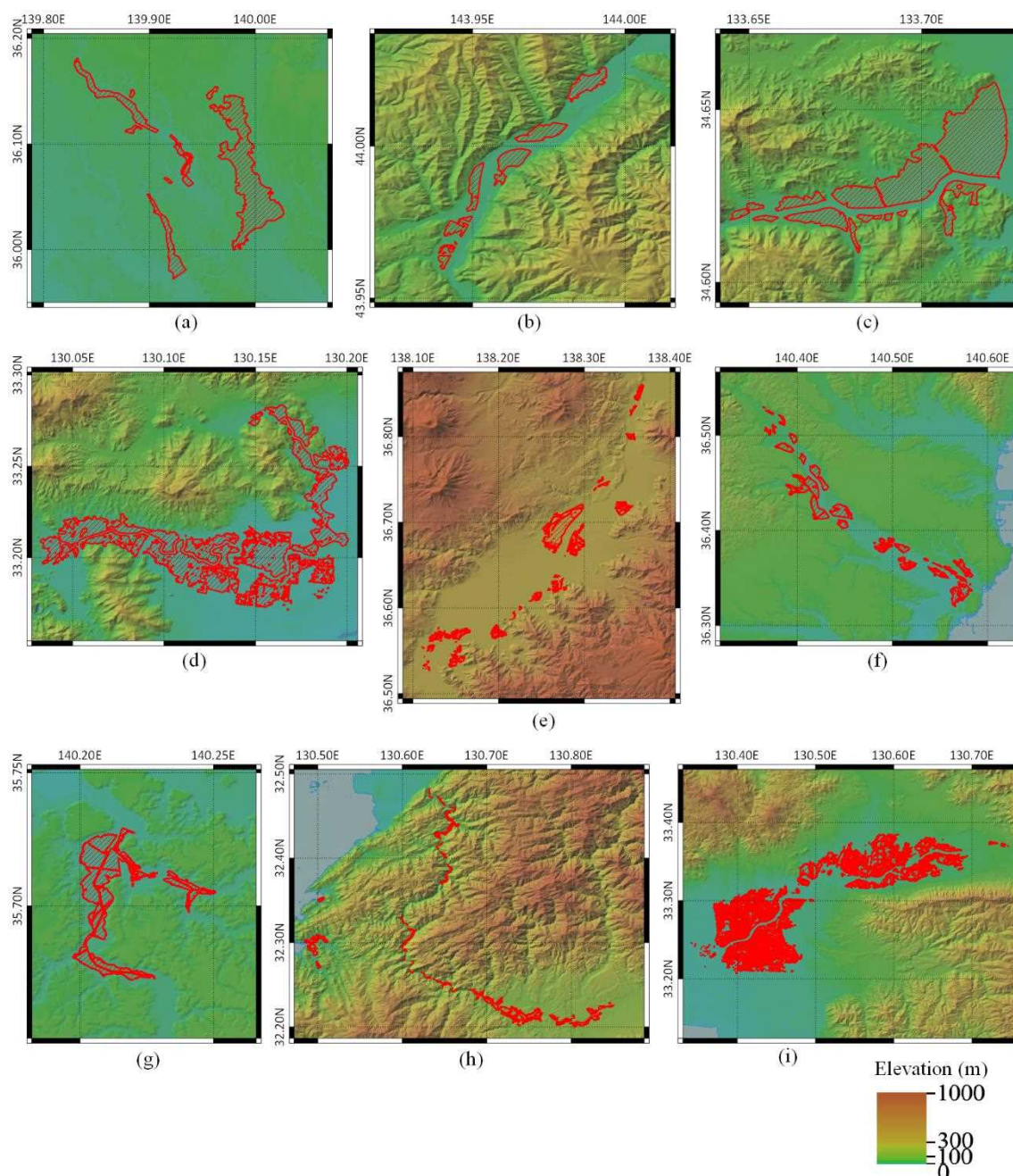


図 5-2 本章で処理する洪水事例と、国土地理院のデータに基づく洪水域の参照データ (赤色のポリゴン、国土地理院推定浸水域図より作成)。背景は国土地理院の基盤地図情報に基づく標高データ。(a)平成 27 年 9 月 関東・東北豪雨 (茨城県常総市付近)、(b)平成 28 年 台風第 9 号 (北海道北見市周辺)、(c)平成 30 年 7 月 豪雨 (岡山県倉敷市周辺)、(d)令和元年 8 月の前線に伴う豪雨 (佐賀県)、(e)令和元年 東日本台風 (長野県千曲市周辺)、(f)同じく 令和元年 東日本台風 (茨城県)、(g)令和元年 10 月の低気圧に伴う大雨 (千葉県佐倉市周辺)、(h)令和 2 年 7 月 豪雨 (熊本県人吉市周辺)、(i)同じく 令和 2 年 7 月 豪雨 (福岡県)。

5.2. 解析アルゴリズム

5.2.1. 前処理

図 5-3 に、本研究で用いる SAR データ、シミュレーションデータ、および補助データ（土地利用図等）の前処理の流れを示し、下記に詳述する。この前処理で得られた画像は次節に述べる洪水抽出のメイン処理の入力となる。

(i) コレジストレーション

災害時 SAR データの SLC が、災害前データと重なるようコレジストレーション（画像の変形による精密な位置合わせ）を行った。災害前データが複数ある場合はその中で最新のもので位置合わせの基準とした。どの画像を基準にコレジストレーションをしても干渉処理は可能であるが、災害前データを基準にした理由は、災害時に緊急で提供される ALOS-2 データは位置情報がオンボード軌道データ（衛星搭載 GNSS 測位に基づく速報的な位置データで、地上基準局に基づく補正がなされていない）であり、データの位置精度が劣る可能性があるためである。

(ii) 強度画像算出、フィルタ

位置合わせした強度画像（災害時・災害前）を強度画像に変換するにあたり、本章は前情報なしで自動処理を行うことも考慮し、第 3 章で行った処理よりもやや強くノイズを低減した。式(3-1)でアジマス×レンジ方向に 2×2 画素のマルチルックにより強度画像に変換し、 3×3 画素の移動ウィンドウの Frost フィルタを適用した。得られた災害時のマルチルック・フィルタ済み強度を a^{co} とする。一方、災害前データは、複数の過去データ a^{pre}_i の最小値 $a^{pre}_{min} = \min(a^{pre}_0, a^{pre}_1, \dots, a^{pre}_n)$ を用いる。最小値以外の統計量（例えば最大値、平均値、分散値など）もある程度有用な情報と考えられるが、処理の簡略化・効率化のために現段階では使用しないこととした。最小値をとることにより、いずれかの画像に含まれる季節的な水田の湛水などを確実に捉え、その影響を除外することができる。

(iii) コヒーレンス算出

干渉 SAR コヒーレンスは、3 時期のデータを使った 2 つのコヒーレンスを用いる。すなわち、災害前の 2 つのデータから求める平時のコヒーレンス γ_{pre} と、災害時と直近の災害前との 2 データから求める災害による変化情報を含むコヒーレンス γ_{co} である。これらは 2×2 画素のマルチルック後に 5×5 画素の移動窓で算出し、前述の強度画像と重畳可能な同じサイズの画像データとする。災害前のデータが多数入手可能な場合にはより多くの組合せのコヒーレンスやその統計量も利用できるが、現時点では、複雑さを避けるため直近 3 時期の

データによる 2 つのコヒーレンスのみを使用した。

(iv) オルソ化、地図投影

地図や他の補助データと重ねて利用できるようなオルソ補正および地図投影を行った。処理内容は 3.1(iii)と同様で解像度は 5m、座標系は UTM、経度帯（ゾーン番号）はそれぞれのデータの地域に応じて 52（九州など）、53（西日本など）、54（東日本など）のいずれかである。

(v) コヒーレンスのヒストグラムマッチングと差計算

建物水害の抽出においては、平時に高いコヒーレンスが災害時に低下することが分かればよいので、コヒーレンス差 $\Delta\gamma = \gamma_{\text{co}} - \gamma_{\text{pre}}$ を用いた。2 変数を 1 つにまとめることで計算が単純化され高速となる。コヒーレンスは、洪水による地表面の状態変化だけでなく、コヒーレンス計算に使用した 2 データの時間差（時間ベースライン）、軌道差（空間ベースライン）、ノイズなど多くの要因による相関劣化によっても変化する[83]。ALOS-2 の場合、観測の時間間隔が長い（2 週間～1 年程度）ため時間相関劣化が特に顕著である。これらの、洪水以外の要因によるコヒーレンス変化が差になるべく含まれないよう、差をとる前に災害時コヒーレンス画像 γ_{co} の明るさを災害前コヒーレンス画像 γ_{pre} の明るさに合わせる、Masked histogram matching 法を新たに考案して使用した（詳細は付章 B）。

なお強度画像については、災害前と災害後で、後方散乱特性の異なる別のオフナディア角を用いる可能性があり、単純に差をとったデータは意味をなさないため、差をとらず前後の強度画像をそれぞれ使用した。

(vi) 洪水面積割合の統計値計算

TE-Japan の洪水面積割合データは 1 時間ごとに提供される準リアルタイムデータであり、ALOS-2 データの観測時刻に最も近いデータを使うのが一見すると妥当である。しかし、モデルの誤差により、TE-Japan によりシミュレートされた物理量は実際の物理現象と比べ時間的にずれがある可能性がある。本研究では洪水面積割合を解析領域の絞り込みや事前確率として用いるため、時間的な誤差により洪水面積割合が過小評価となっている場合、本アルゴリズムの洪水抽出結果も過小評価となる。そこで、本アルゴリズムでは、確実に洪水のワーストケースを捉えるために SAR の観測時刻を含む 24 時間分のデータの時間最大値を用いた。

(vii) 洪水面積割合等の投影法変換

求められた洪水面積割合（24 時間最大値）は、元データが等緯度経度図法（正距円筒図法、Equirectangular projection）の画像データであり、SAR 画像 a^{co} 、 $a^{\text{pre}}_{\text{min}}$ 、 $\Delta\gamma$ と重畳できるように、同じ投影法（UTM）、解像度（5m）および範囲になるよう変形した（このデータを *FLDFRC* と表す）。同様に、土地利用土地被覆図（HRLULC）も等緯度経度図法であるため、同様に変換した（このデータを *LULC* と表す）。

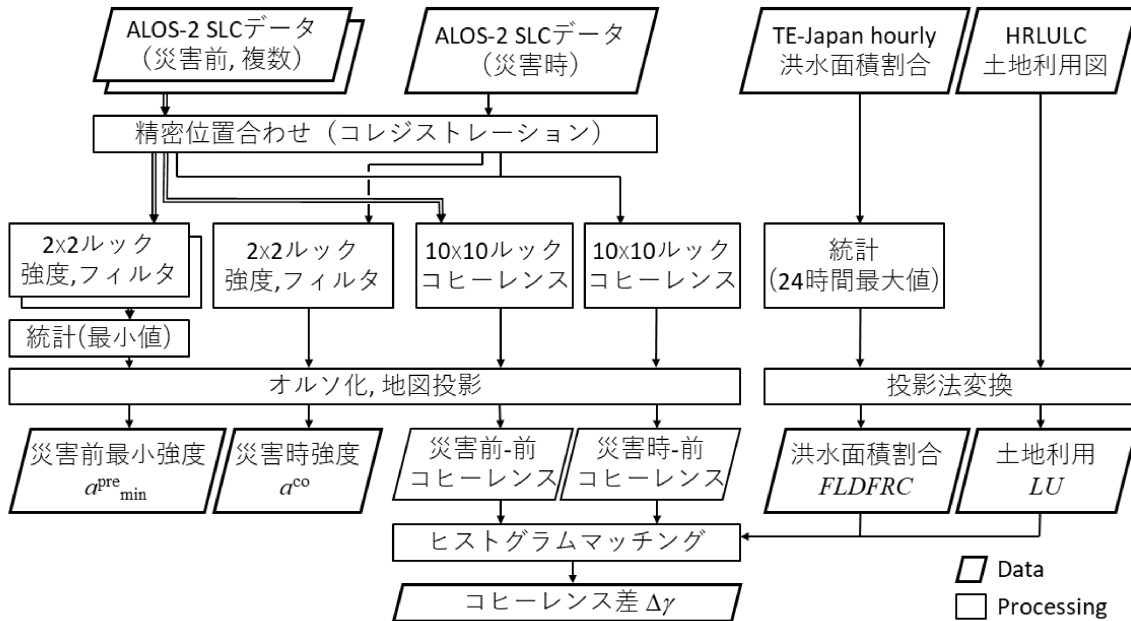


図 5-3 自動洪水抽出アルゴリズムに必要な画像を生成するための前処理の処理フロー。

5.2.2. メイン処理

図 5-4 に、前節で作成した入力画像から洪水域抽出を行うメイン処理のフローを示し、下記に詳述する。本アルゴリズムは処理の高速性、ロバスト性を重視しているため使用する入力画像の数は最小限としており、SAR データは災害後強度画像 a_{co} 、災害前強度画像（時系列最小値） a_{min}^{pre} 、コヒーレンス差 $\Delta\gamma$ の 3 つである。これらの SAR データを、本アルゴリズムでは 1 つの確率変数ベクトル $\mathbf{x} = (a_{co}, a_{min}^{pre}, \Delta\gamma)^T$ とし、これを画素ごとにベイズ推定を用いて洪水、非洪水等に分類した。洪水面積割合（24 時間最大値） $FLDFRC$ は、このベイズ推定における事前確率に使用した。また、洪水シミュレーションにおいて著しく洪水の可能性が著しく低い場所は、処理時間の削減のため処理を省くことにし、ここでは $FLDFRC < 0.05$ の画素はマスクし、以降の処理は行わなかった。

(i) ベイズ推定による初期分類画像の作成

洪水域は、土地被覆によって SAR データにおける見え方が異なる複数の散乱メカニズムがあるため、図 5-5 のような複数のカテゴリへの分類をまず行うこととした。 F_1 ：不変な非水域（建物域、農地など）、 F_2 ：不変な水域（河川、水路、湖沼、ため池など）、 F_3 ：完全水没の洪水（非建物の洪水）、 F_4 ：建物域の浸水である。 F_5 は植生の浸水で、1.3.1 節に述べたように本研究のターゲットである日本国内の災害ではまれなケースであり、分類問題にお

いては分類項目数をいたずらに増やすことは誤分類の増加につながるため、ここでは F_1 から F_4 の四値のみの分類を行った。本アルゴリズムには拡張性を持たせ、 F_5 については将来的に対応できるように考慮した。

SAR データ（画素値）が \mathbf{x} であるとき、それが状態 F_i ($i = 1, 2, 3, 4$) に当てはまる確率は、それぞれ条件付き確率 $P(F_i|\mathbf{x})$ として次のように求められる。

$$P(F_i|\mathbf{x}) = \frac{P(F_i)P(\mathbf{x}|F_i)}{\sum_{j=1}^4 P(F_j)P(\mathbf{x}|F_j)} \quad (5-1)$$

ここで $P(F_i)$ は事前確率、 $P(\mathbf{x}|F_i)$ は各状態 F_i における \mathbf{x} の確率分布関数である（それぞれ後述する）。多分野でよく用いられるベイズ推定であり、リモートセンシングデータによる洪水抽出でも Giustarini[31] のアルゴリズムなどが採用している。単純ではあるが処理が高速で、かつ入力（SAR とシミュレーションデータ）と出力（各状態の確率）の関係が分かりやすいモデルであり、画像の明暗での比較的単純な判断を基本とする本アルゴリズムにおいては十分なモデルである。

式(5-1)における事前確率 $P(F_i)$ は、洪水確率の事前情報であり、*FLDFRC* を用いて決定する。しかし、*FLDFRC* の値をそのまま代入するのは適切ではない。本アルゴリズムで用いる *FLDFRC* は 24 時間最大値であり、洪水の可能性のワーストケースを示すものである。よって、SAR 観測時刻における実際の洪水状況よりも過大評価されている可能性がある。そこで、本アルゴリズムでは D'Addabbo[57] に倣い、シミュレーションの値をそのまま事前確率とする代わりに、次のようにロジスティック関数を介して値を調整してから代入した。

$$f = \frac{A}{1 + B \exp(FLDFRC - C)} \quad (5-2)$$

$$\begin{cases} P(F_1) = P(F_2) = \frac{1-f}{2} \\ P(F_3) = P(F_4) = \frac{f}{2} \end{cases} \quad (5-3)$$

ここで f は洪水の事前確率であり、式(5-1)より、 f が 0（あるいは 1）のときは SAR データの値に関わらず洪水の確率は 0（あるいは 1）となり、 f は洪水抽出結果を強く支配する。 $f = 0.5$ の場合は事前確率は中立となり、SAR の情報だけで洪水を推定するのと等価となる。式(5-2)の A 、 B 、 C はロジスティック関数のパラメータであり、図 5-6 に示すように、関数の最大値を規定する A は 0.5、関数の立ち上がりの尖度を決める $1/B$ は 0.1、立ち上がりの

位置を決める C は 0.2 とした。これらの値は次のような理由で経験的に決定した。本研究で用いる $FLDFRC$ は時間最大値を用いており、洪水確率を過大評価する傾向にある。よって $FLDFRC$ が 1 に近くても実際の状況は洪水とは限らないため、 f の最大値は 0.5 (中立) で留まるようにした。 $FLDFRC$ が 0 に近い場合は実際に非洪水の確率は低いと考えられるので 0 に近い値となるようにした。また、 $FLDFRC$ の (SAR と比較すれば) 低い空間解像度で表現できていない微小な洪水などでは値が過小評価になるため、経験的に $FLDFRC$ が 0.3 程度の比較的小さい値でも洪水は発生しうる。そこで $FLDFRC = 0.3$ 程度で最大値の $f = 0.5$ 程度に達するように B と C を調整した。以上によって、洪水の事前確率 f (および非洪水の事前確率 $1 - f$) が決定される。さらに、本アルゴリズムでは非洪水は F_1 、 F_2 、洪水は F_3 、 F_4 のそれぞれ 2 通りの状態に細分化されているため、それぞれの事前確率も式(5-3)のように 2 で割ることにより均等に割り振った。

式(5-1)に戻り、確率分布関数 $P(\mathbf{x}|F_i)$ の決定方法を述べる。本研究は SAR データの数値の大小で水域を判定する比較的単純な問題であることから、複雑な分布関数によるモデリング (例えば K-means 法による、多数の正規分布の和による複雑なモデルの表現) は必要とせず、単純な n 次元の多変量正規分布 N_n を仮定して次のように与える。

$$P(\mathbf{x}|F_i) = N_n(\boldsymbol{\mu}_i, \boldsymbol{\Sigma}_i) \quad (5-4)$$

ここで n は、確率ベクトル \mathbf{x} が 3 つの変数からなる (災害前強度、災害時強度、コヒーレンス差) ことから $n = 3$ である。正規分布のパラメータは、状態 F_i における \mathbf{x} の平均 $\boldsymbol{\mu}_i$ 、分散 $\boldsymbol{\Sigma}_i$ の 2 つがある。 $\boldsymbol{\Sigma}_i$ は $n \times n$ の共分散行列であるが、ここでは \mathbf{x} の 3 成分が統計的に独立である (非対角成分は零) と仮定し、 \mathbf{x} の 3 成分のばらつきを表す対角成分のみを与える。 $\boldsymbol{\mu}_i$ 、 $\boldsymbol{\Sigma}_i$ の具体的な値は表 5-2(a) のように与える。表中で τ_a は強度画像において画素値が水面かどうかを見分ける閾値であり、例えば F_3 (完全水没の洪水) は、災害前は強度が強く ($a^{\text{pre}}_{\min} < \tau_a + \varepsilon_a$)、災害時は強度が弱くなる ($a^{\text{co}} > \tau_a - \varepsilon_a$) ように与える。 F_4 (建物洪水) は、建物からの反射のため災害前後ともに強度は大きい、コヒーレンスは低下する (差が負方向に大きい) というモデルとする ($\Delta\gamma < \tau_{\Delta\gamma} - \varepsilon_{\Delta\gamma}$)。閾値 τ_a の具体的な値は、第 3 章の研究に基づけばオフナディア角に応じて最適な閾値は異なるため、経験的に表 5-2(b) のように与えた。第 3 章の検討から観測条件が良ければ閾値の値は 1dB 程度異なっても精度の変化は少ないことから、閾値の設定は 1dB 刻みの大まかな数値で十分である。 ε_a は確率密度関数の分散の大きさを示し、これが大きいほど SAR の画素値のばらつきが大きく水面を判定しにく

いことを表している。 ϵ_a を大きくすると相対的に SAR のデータの寄与は弱くなり、洪水シミュレーションによる事前確率がより支配的になることから、SAR の観測条件が悪い場合に大きめの値を設定するのが有効である。そこで、第3章の考察（大きいオフナディア角においては裸地や畑地など後方散乱計数が小さい地面と水面とが区別しにくく、また S/N も良くない）ことに基づき、大きいオフナディア角において高めの値を設定した。なお、コヒーレンスに関する閾値 $\tau_{\Delta\gamma}$ と分散 $\epsilon_{\Delta\gamma}$ については、オフナディア角依存性について明確な知見がないことや、もともと干渉処理が可能なのは過去データの整備状況から 30–40° 程度のオフナディア角に限られていることから、現状では全てのオフナディア角で共通の値を与えた。

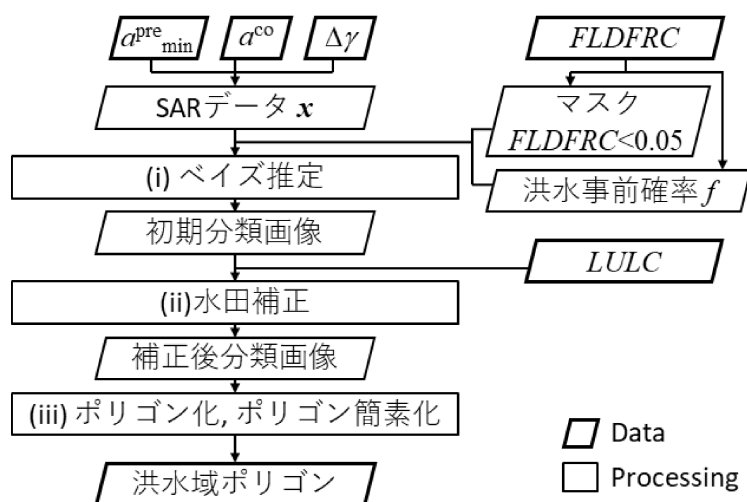


図 5-4 自動洪水抽出アルゴリズムのメインとなる洪水抽出処理の処理フロー。

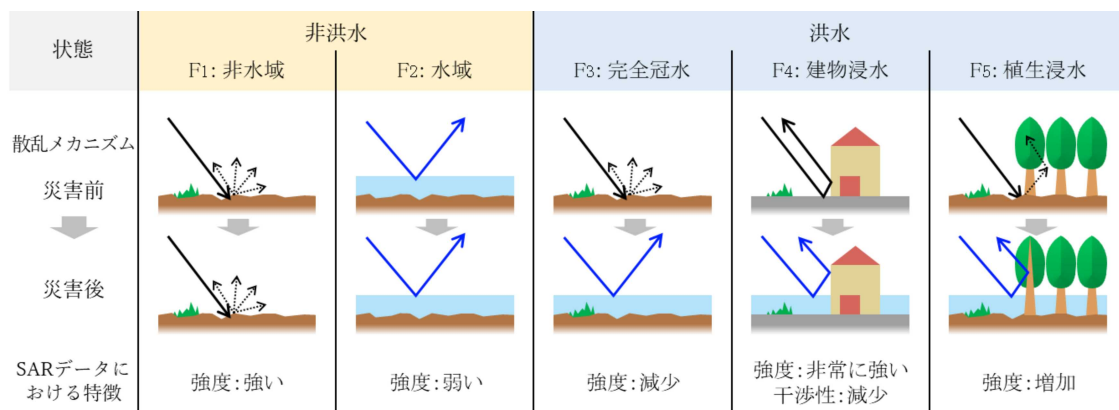


図 5-5 本アルゴリズムで扱う洪水・非洪水に関する各状態と、それらの SAR データにおける特徴の模式図。F₅ は現状では使用しておらず、将来的に拡張予定である。

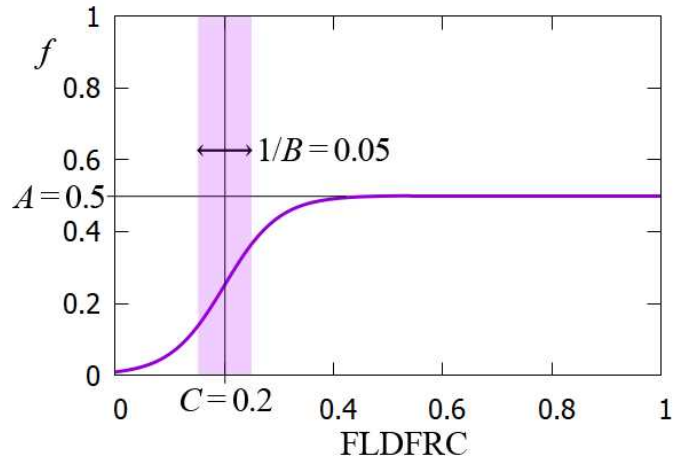


図 5-6 本アルゴリズムで用いた洪水の事前確率 f と洪水面積割合 $FLDFRC$ の関係。

表 5-2 (a)本アルゴリズムで用いる、各状態に対する SAR データの確率分布関数、(b) (a) におけるパラメータの詳細。使用するのは ALOS-2 の高分解能 3m モードのデータ。

(a)

μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$
$\begin{pmatrix} \tau_a + \varepsilon_a \\ \tau_a + \varepsilon_a \\ \tau_{\Delta\gamma} + \varepsilon_{\Delta\gamma} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \tau_a - \varepsilon_a \\ \tau_a - \varepsilon_a \\ \tau_{\Delta\gamma} + \varepsilon_{\Delta\gamma} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \tau_a - \varepsilon_a \\ \tau_a + \varepsilon_a \\ \tau_{\Delta\gamma} + \varepsilon_{\Delta\gamma} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \tau_a + \varepsilon_a \\ \tau_a + \varepsilon_a \\ \tau_{\Delta\gamma} - \varepsilon_{\Delta\gamma} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \varepsilon_a & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_a & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{\Delta\gamma} \end{pmatrix}$

(b)

ビーム番号	オフナディア角	τ_a (dB)	ε_a (dB)	$\tau_{\Delta\gamma}$	$\varepsilon_{\Delta\gamma}$
≤ 2	13.9	-10	1	-0.3	0.1
3	18.0	-11	1		
4	21.9	-11	1		
5	25.6	-11	1		
6	29.1	-12	1		
7	32.7	-13	1		
8	35.4	-14	1		
9	38.2	-14	1		
10	40.6	-15	2		
11	42.7	-15	2		
12	44.7	-14	2		
13	46.4	-14	2		
≥ 14	48.0	-14	3		

(ii) 水田における誤分類の補正

図 5-7(a)に、平成 30 年 7 月豪雨の小田川（倉敷市）の実際の処理画像を例に、式(5-1)で得られた F_2 - F_4 の確率を色分けして図示する。各画素で確率が最も高い状態に分類することで、図 5-7(b)のような 4 値の初期分類結果が得られる。この初期分類画像において、大部分を占める水田の洪水 (F_3 =水没と分類されるべき) が、災害前に農事により湛水していることが原因で F_2 =非洪水 (恒常水域) と誤分類されている。このような水田の湛水に起因する誤分類を補正するため、水田に対しては次のような補正処理を行った： F_2 (恒常水域) に分類された画素の周囲 21×21 画素のウィンドウ内に F_3 (水没) に分類された画素が 5%以上存在する場合には、その中心画素を F_2 から F_3 に変更する。この補正は次のような原理に基づいている。水田の圃場内は災害前画像に湛水していると災害時に冠水しても恒常水域と見なされるが、圃場を囲む道路やあぜ道は災害前も画像に結像しており災害時に水没すると正しく水没と分類されている。これを利用し、周辺に水没した道路やあぜ道があればその農地は洪水と判断できる。ここで使用したウィンドウサイズ 21×21 画素 (約 100m 四方) は、日本の水田の圃場の大きさは多くが長手方向に最大 100m 程度であることを根拠としている。この補正はあくまで水田のみに適用すべき補正であり水田の位置の事前情報が必須であるため、土地利用図を用いた。この水田の補正を行った後の分類画像が図 5-7(c)である。このような周辺の畦畔を利用した空間的なフィルタは、農地の洪水を平時の湛水と区別する有効な手法であり、アジア域の農地洪水の抽出に類似の方法が用いられた例がある[106]。

(iii) 洪水域マップのポリゴン化、ポリゴン簡素化

得られた 4 値の分類画像は洪水/非洪水に 2 値化した。すなわち F_1 と F_2 を非洪水、 F_3 、 F_4 を洪水に統合した。この結果に 3.1 節(iv)と同じモルフォロジ演算を適用して得られた洪水抽出結果 (画像) が図 5-7(d)である。

次に、この二値化画像の洪水部分の形状をポリゴン化した。このとき、大きさが 400 平方メートルに満たないポリゴンは多数の誤分類を含むため削除した (ただし 20 メートル=4 画素以下の近接したポリゴン同士はそれらの面積を合算)。すなわち、本アルゴリズムで検出される最小の洪水は 400 平方メートルであり、源泉となる SAR データの画素面積に対する検出できるターゲットの最小面積を表す最小マッピング単位 (Minimum Mapping Unit、MMU) は約 40 ピクセルとなる。SAR データには原理的に避けられないスペックルノイズがあり画素値は確率的に振舞うため、信頼できるデータを得るにはある程度の数のピクセル数の統計が必要である。例えば Tveit らによる Sentinel-1 の C バンド SAR データによる洪水検出アルゴリズムの MMU は 30 ピクセルとなっており[49]、本研究とほぼ近い数値である。この面積によるスクリーニングのほかに、面積が大きい順に上位 200 個のポリゴンを残し、それに満たないポリゴンも削除する。これは、SAR データは時として季節変化や電

離層、地上の無線機器からの不要波などの予測困難な要因により画質が大きく低下する可能性が排除できず、本アルゴリズムは人間の目視による結果のチェックを前提としない全自動のアルゴリズムであることから、画像のノイズが極端に大きい場合に大量のポリゴンが生成され、膨大なデータが出力されるのを防ぐフェールセーフである。

次にポリゴンの形状の単純化も行った。二値化画像をポリゴン化した状態初期のポリゴンデータは、通常正方形である画素の形状がそのままポリゴンの頂点に変換され、多量の座標データを含んだ膨大なデータとなる。このような冗長なデータを削減するため、Ramer-Douglas-Peucker 法によってポリゴンの形状を単純化した[107]。この方法では、ポリゴンの多数の頂点を、距離の誤差が一定の許容値（本研究では 20m とした）以下となるようなできるだけ長い近似的な線分で置き換えていく。線分と頂点との距離が許容値を超える（1つの線分で形状を近似できない）場合には前の線分の続きに新たな線分を定義し、これを繰り返すことにより、許容値以内の誤差で最低限の数の頂点からなる近似的なポリゴンに変換する。

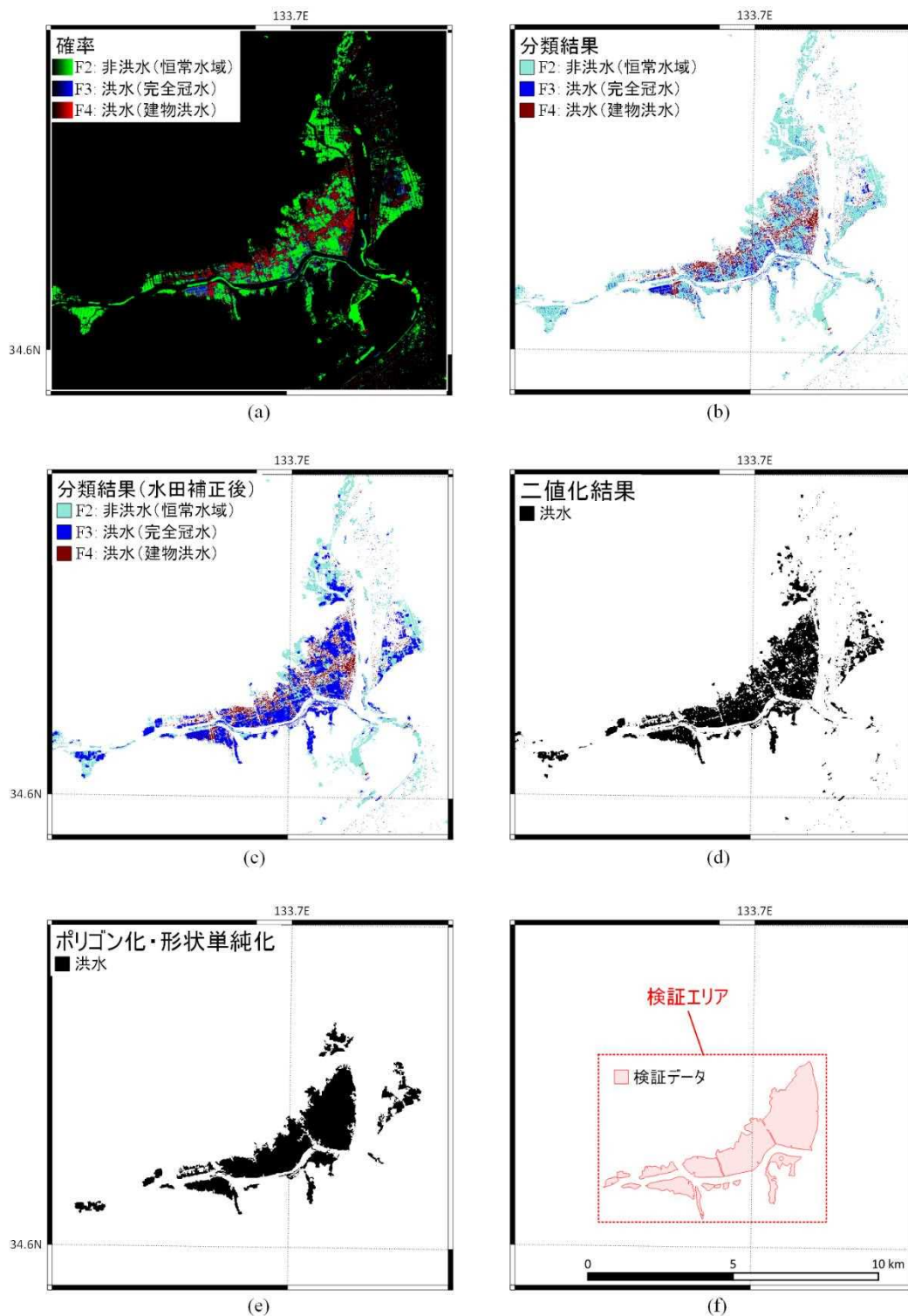


図 5-7 本アルゴリズムの出力を順次的に示す。(a)F₂、F₃、F₄の確率マップ、(b)F₁–F₄の4値への初期(水田の誤分類の補正前)分類図、(c)水田の誤分類の補正後の分類図、(d)非洪水(F₁およびF₂)／洪水(F₃およびF₄)へ二値化しポリゴン化したもの、(e)ポリゴンの形状単純化を行った最終出力結果。(f)に国土地理院による検証データを比較のため示す。

5.2.3. 様々なデータに対する柔軟性

本アルゴリズムは、緊急時の様々な場面での使用を考慮し、データのうち幾つかが得られない場合でもある程度動作するようにした。

干渉処理が可能な災害前データがない場合には、分類のカテゴリを3つに減らし(F_1 、 F_2 、 F_3 のみ)、確率変数ベクトルの要素も強度画像のみ、すなわち $\mathbf{x} = (a^{co}, a^{pre}_{min})^T$ とすれば洪水抽出が可能である。この場合、コヒーレンスの情報が無いため建物洪水については検出困難となるが、建物が少なく散在している場合には周辺の非建物域の洪水から穴埋めできるため影響は少ない。シミュレーションによる洪水面積割合データや、それに類する洪水確率の事前情報が得られない場合には、式(5-2)において、洪水・非洪水どちらの確率にも重みをもたせない $f=0.5$ の値を使用することで、事前情報なしで SAR のデータのみから分類が行われる。

逆に、分類カテゴリや確率変数を増やすことも可能である。本論文がターゲットとする日本国内の水害ではまれであるため現段階では扱っていないが、森林域が浸水すると二回反射効果により強度が上昇するため、これを抽出できるよう森林洪水をカテゴリに加えることもできる[26]。この場合、図 5-5 に示すカテゴリ F_5 (森林洪水) を追加した 5 値の分類とし、強度の増加を考慮するため強度差 Δa を確率変数に追加し、 $\mathbf{x} = (a^{co}, a^{pre}_{min}, \Delta\gamma, \Delta a)^T$ とすることで抽出可能となる。 Δa の閾値は後方散乱が有意に上昇(電力で 2 倍程度)に増加したことに相当する 6dB 程度がよいと考えられる。

5.3. 結果

5.3.1. 検証結果の全体的な傾向

図 5-8 に、本アルゴリズムによる洪水抽出精度および計算時間を示す。表 5-1 の各事例について、また、TE-Japan の洪水面積割合を使用する／しないの各場合についての比較となっている。図 5-8(a)、(b)、(c)は精度を κ 係数、Precision、Recall でそれぞれ示しており、洪水面積割合を使用すると全体的な精度および Precision が特に向上する傾向が分かる。表 5-3 には精度の数値の詳細を示す。洪水面積を使用した場合、多くのケースで精度が向上し、データ 12 (平成 30 年 7 月豪雨倉敷市) が最も高い精度 ($\kappa \sim 0.9$) を示し、精度が最も劣るデータでは 0.4 程度、平均的には 0.6 程度の精度だった。また、Precision は Recall より高い傾向

があることから、本アルゴリズムは、過剰検出は少なく未検出が相対的に多い傾向だった。データ 13、16、19 では、SAR の観測時刻が洪水のピークから離れており、参照データと比べ SAR で抽出可能な洪水域は少なく、精度検証は困難であった。ただしその場合でも、SAR 結果による洪水域が参照データの洪水域に含まれると仮定し、SAR 結果による洪水域を分母とした正答の割合である Precision のみは評価した。

図 5-8(c)には計算時間の比較を示し、いずれのデータに対しても、TE-Japan の洪水面積割合を使用した場合に計算時間が短縮された。なお、この計算時間は 5.2.2(ii)のメイン処理のみの時間を示しており、(i)前処理 (約 20 分) や(ii)検証 (事後に行うものであり災害時は行わない) は含んでいない。前処理の時間を加えても、30 分以下で洪水抽出が可能である。計算速度の検証は Intel XEON Gold (2.6 GHz) のプロセッサ 8 コアの環境で測定した。

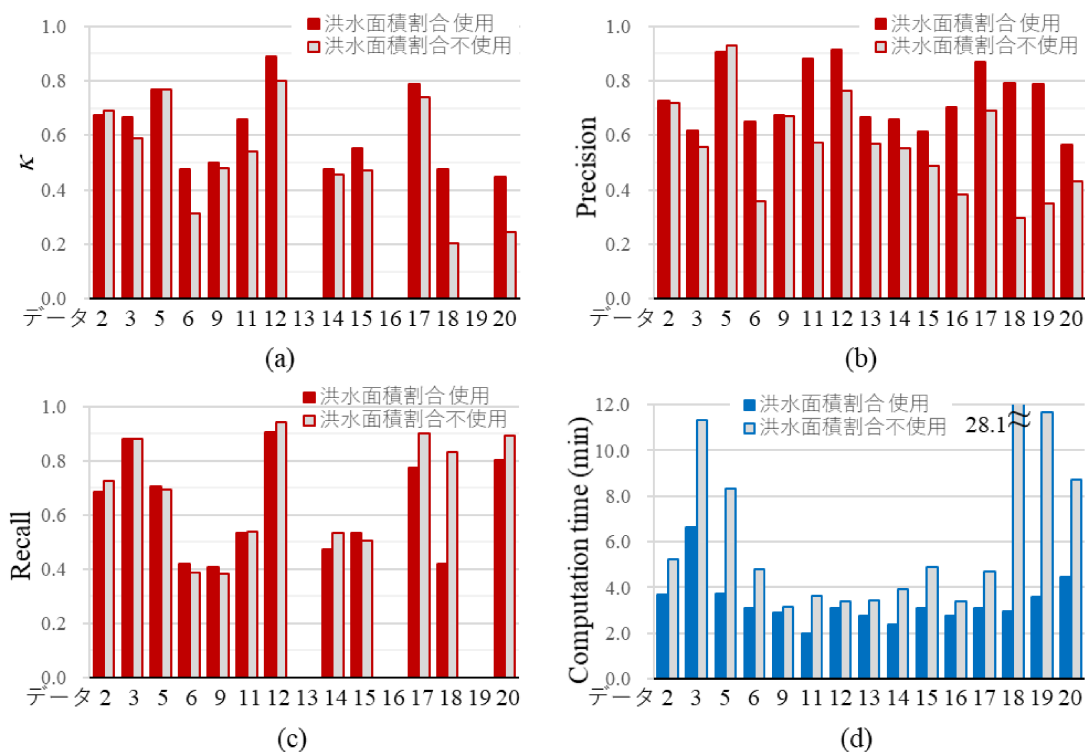


図 5-8 ALOS-2 による洪水抽出結果。表 5-1 の各事例について、TE-Japan の洪水面積割合を使用する／しないを比較している。(a) κ 係数での精度比較、(b)Precision での精度比較、(c)Recall での精度比較、および(d)計算時間の比較。

表 5-3 ALOS-2 による各事例の洪水抽出精度の詳細。

災害	災害時データの諸元		シミュレーション (洪水面積割合) 不使用				シミュレーション (洪水面積割合) 使用			
	日時	オフナ ディア角	k	F_{measure}	Precision	Recall	k	F_{measure}	Precision	Recall
H27.9 関東・ 東北豪雨	2015/09/11 22:56 (データ 2)	35.4°	0.691	0.723	0.718	0.727	0.673	0.706	0.727	0.685
	2015/09/12 12:23 (データ 3)	35.4°	0.633	0.718	0.606	0.880	0.665	0.741	0.641	0.878
	2015/09/13 23:37 (データ 5)	35.4°	0.769	0.793	0.931	0.691	0.769	0.793	0.904	0.707
	2015/09/14 11:28 (データ 6)	48.0°	0.315	0.372	0.358	0.388	0.477	0.509	0.652	0.418
H28 台風第 9 号	2015/09/16 12:30 (データ 9)	13.9°	0.481	0.488	0.672	0.383	0.501	0.508	0.674	0.408
H30.7 豪雨	2016/08/22 23:12 (データ 11)	29.1°	0.541	0.555	0.573	0.539	0.658	0.666	0.882	0.535
	2018/07/08 00:05 (データ 12)	38.2°	0.799	0.842	0.763	0.940	0.888	0.909	0.915	0.904
R1.8 の前線	2019/08/28 00:18 (データ 13)	35.4°	-	-	0.568	-	-	-	0.667	-
	2019/08/28 12:11 (データ 14)	44.7°	0.455	0.544	0.554	0.535	0.477	0.550	0.657	0.473
R1 東日本台風	2019/10/13 11:56 (データ 15)	25.6°	0.472	0.496	0.487	0.506	0.553	0.571	0.614	0.534
	2019/10/14 12:17 (データ 16)	29.1°	-	-	0.381	-	-	-	0.705	-
R1.10 の低気圧	2019/10/26 11:36 (データ 17)	40.6°	0.739	0.783	0.692	0.902	0.789	0.819	0.870	0.773
	2020/07/04 13:13 (データ 18)	50.9°	0.202	0.436	0.295	0.833	0.474	0.547	0.791	0.417
R2.7 豪雨	2020/07/05 00:34 (データ 19)	18.0°	-	-	0.350	-	-	-	0.789	-
	2020/07/07 23:07 (データ 20)	40.6°	0.245	0.582	0.431	0.894	0.449	0.663	0.564	0.805

5.3.2. 各データの検証結果の詳細

図 5-9 に各データにより抽出された洪水域を示す。これらの図は得られた洪水抽出結果を黒色、国土地理院による検証データを赤線で示す。また、TE による洪水面積割合を使用した場合（左列）としない場合（右列）を比較している。

平成 27 年 9 月関東・東北豪雨（データ 2、3、5、6、9）の結果のうち、オフナディア角が比較的小さい 2、3、5、9 は、洪水面積割合を使用した場合の精度向上効果は比較的小さかった。これらのデータの処理で使用した洪水面積割合データは、それぞれの観測時刻のものではなく、データ 2（9 月 11 日）の観測時刻から遡った 24 時間最大値を共通して用いた。これは、TE の洪水面積割合は 9 月 12 日以降に急速に洪水面積が低下し、洪水の事前情報として使用できないためである。このようになる理由は、洪水面積割合は増水による越水は考慮しているが、堤防の破壊（破堤）は考慮しておらず、現実には破堤により長期間の冠水が起こっていたことである。

なお、検証は茨城県常総市の浸水域を中心に行ったが、データ 2（9 月 11 日）のみ隣接する茨城県坂東市まで検証データがあるため精度検証に含めている。また、検証データはないものの渡良遊水地（谷中湖）の水域の増加も捉えられている（図 5-9b）。渡良瀬遊水地は日本最大級の貯水池であり、増水時に有効に機能していたと見られる。

平成 28 年台風第 9 号（データ 11）は、災害前コヒーレンス画像の干渉性低下が著しかったが、本研究で提案したヒストグラムマッチングが有効に機能したことと、もともと建物域が少ないことからあまり影響を受けず、比較的高い精度が得られている。

平成 30 年 7 月豪雨（データ 12）は干渉性の高い過去データが得られオフナディア角の条件もよく、結果として精度も良好で洪水面積を用いない場合でも $\kappa = 0.8$ 、用いた場合は 0.9 程度の高い精度が得られた。検証エリア外で抽出された洪水は検証できるデータがなく不明であるが、低地での内水氾濫が起きている状況を捉えていると推測される。

令和元年 8 月の前線による洪水（データ 14）は、オフナディア角が大きく、建物域が浸水しているにもかかわらず建物浸水の抽出に有効な干渉処理を行える過去データがない。結果的に、精度は比較的劣っている。

令和元年東日本台風の千曲川の洪水（データ 15）は、高分解能モードでは干渉可能なデータがないため、代替として同じオフナディア角をカバーする広域観測モードを使用した。解像度の低い広域観測モードの画像を観測時の高分解能（3m）モードの画像に内挿し位置合わせしているが、帯域やパルス繰り返し周波数（Pulse Repetition Frequency、PRF）の違いから高分解能モード同士の干渉処理に匹敵する高い干渉性を得るには多くのピクセルの平

均化が必要であり、コヒーレンスを 10×40 ピクセルのウィンドウで計算した (2×8 画素のマルチルック後に 5×5 の移動窓を使用、空間解像度 100m 相当)。強度画像については、干渉処理する必要はないことから、解像度を優先して異なるオフナディア角の高分解能モードデータを使用した。広域観測モードのデータは個々の建物の大きさに比べれば解像度は低いですが、ある程度の大きさの密集した建物浸水であればマクロ的にそれを捉えることは可能であることが確認できた。

令和元年の低気圧による洪水（データ 17）は、干渉処理を行える過去データが無いが、建物域の浸水がほとんどないためその影響は少なく、高い精度が得られている。

令和 2 年 7 月豪雨の球磨川洪水（データ 18）は、オフナディア角が極めて大きく、本研究で推奨する範囲（50 度程度まで）を逸脱しているが、一定の精度が得られている。同時期の筑後川の洪水（データ 20）は、SAR データの観測時刻の方が洪水のピークに近く、検証データ（SAR よりも約 13 時間遅れたデータ）よりも広範囲の洪水を捉えている。結果として、検証データと比べて過大評価と見なされたために全体的な精度は低くなった。他のデータでは Recall よりも Precision が高い傾向にあるが、本データでは SAR 結果による洪水域が検証データの洪水域を包含していることから、逆に Recall が極めて高い精度を示している。

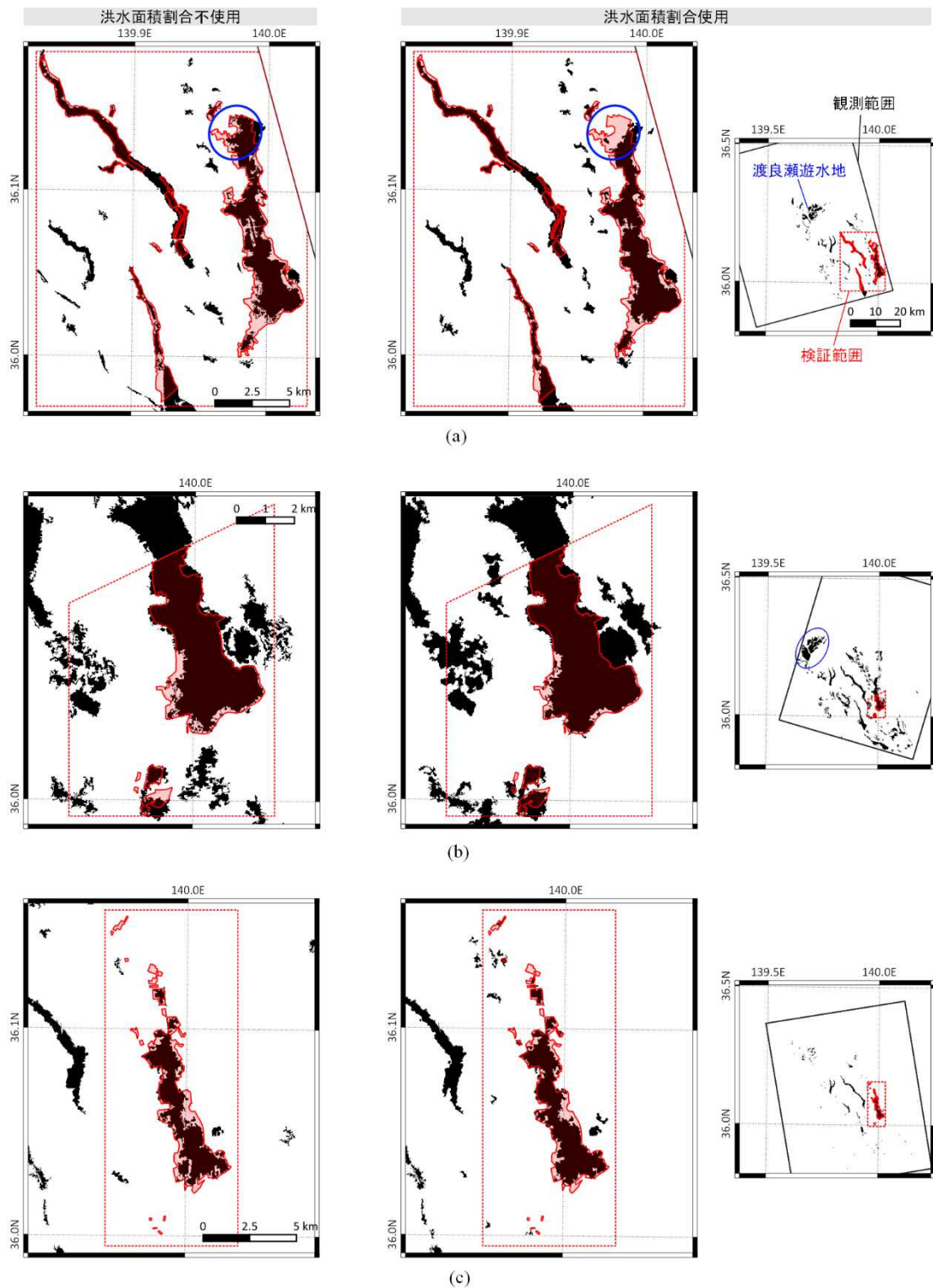


図 5-9 本アルゴリズムで ALOS-2 データより得られた洪水抽出結果を黒色、国土地理院による検証データを赤線で示す。また、TE による洪水面積割合を使用した場合（左列）としない場合（右列）を比較している。平成 27 年 9 月関東・東北豪雨の(a)9 月 11 日夜（データ 2）、(b)9 月 12 日昼（データ 3）、(c)9 月 13 日夜（データ 5）のデータ。

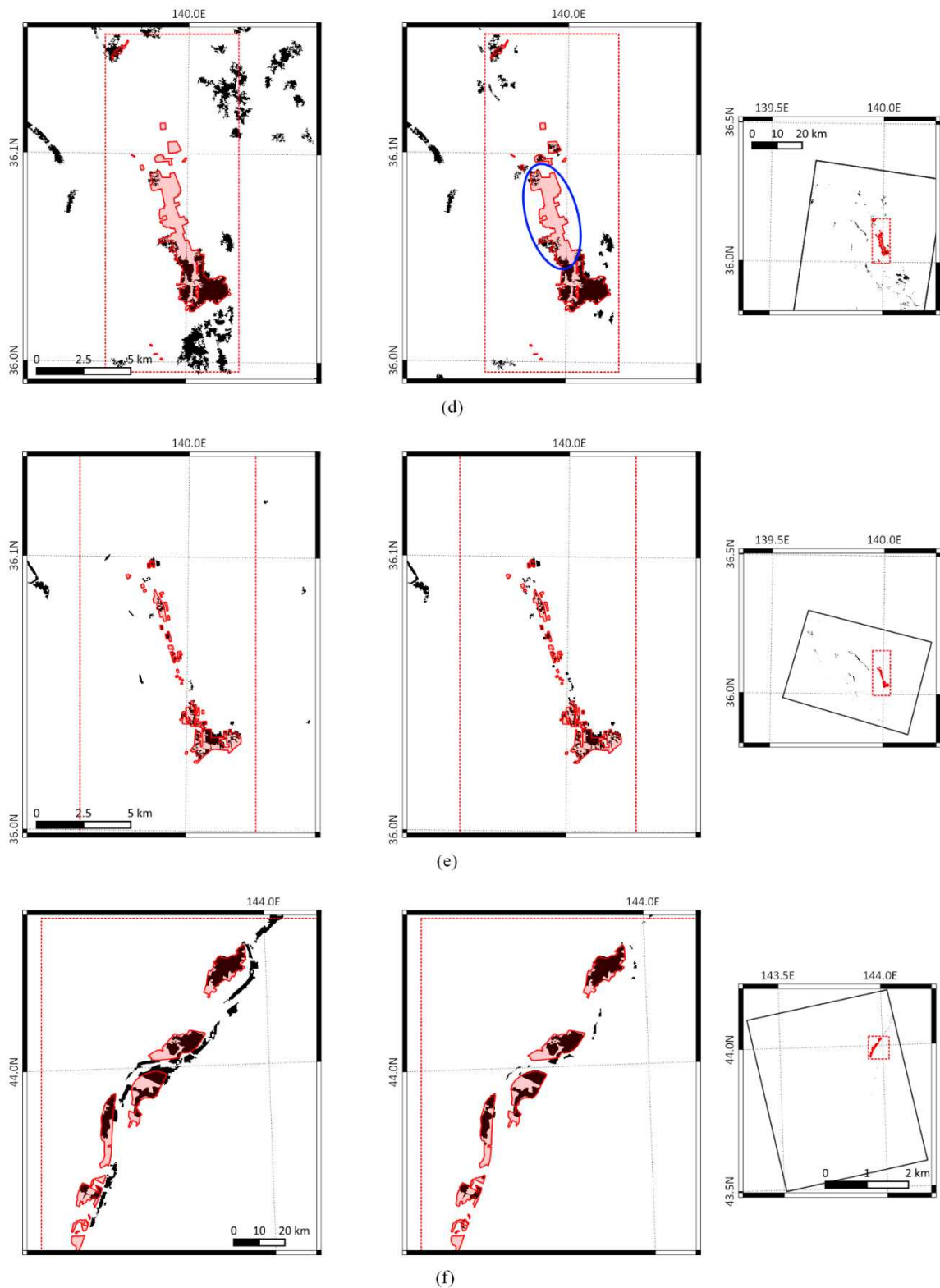


図 5-9 (続き) 平成 27 年 9 月関東・東北豪雨の(d)9 月 14 日昼 (データ 6)、(e)9 月 16 日昼 (データ 9)、(f)平成 28 年台風第 9 号 (データ 11) のデータ。

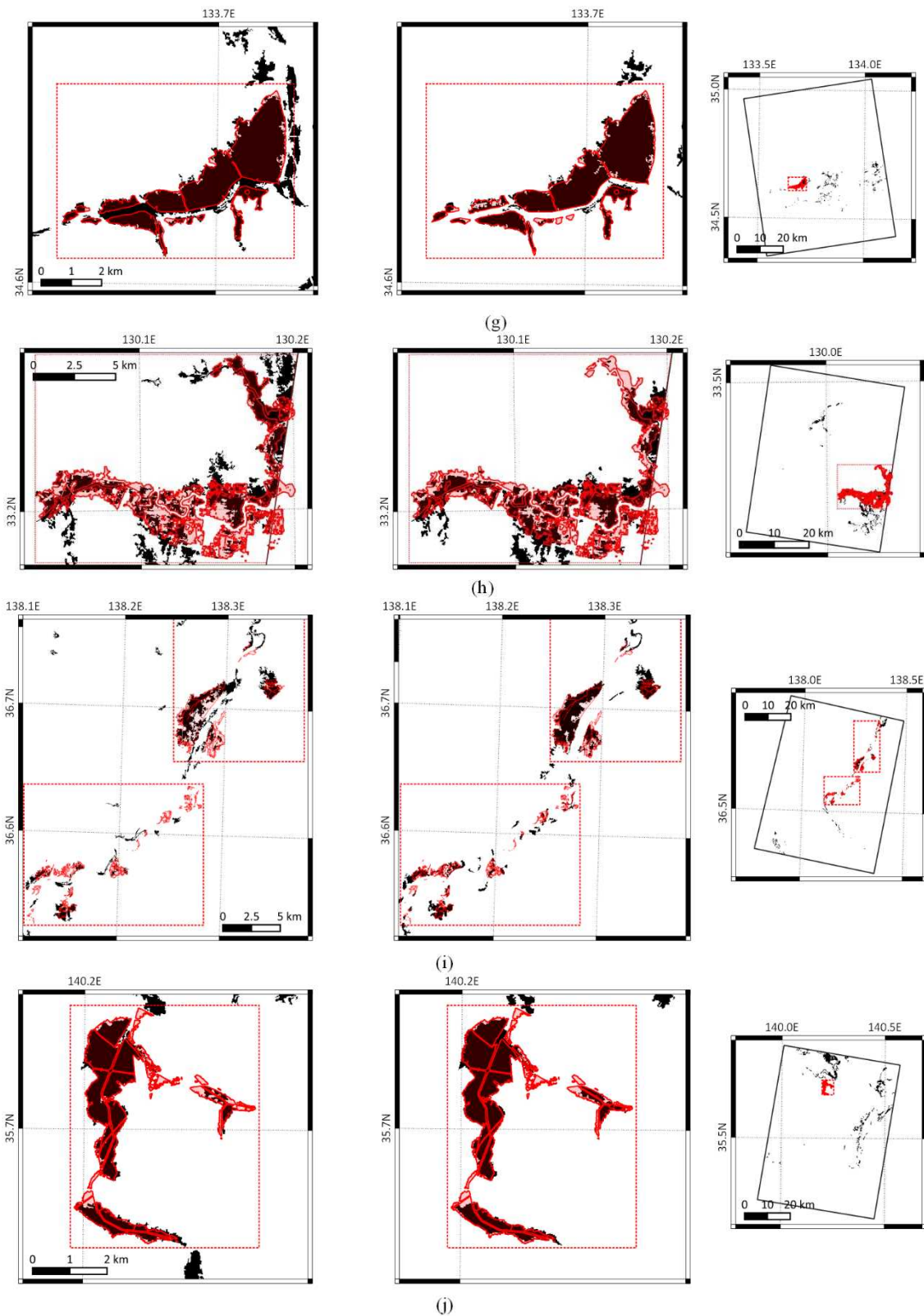


図 5-9 (続き) (g)平成 30 年 7 月豪雨の 7 月 7 日夜 (データ 12)、(h)令和元年 8 月の前線に伴う大雨の 8 月 28 日昼 (データ 14)、(i)令和元年東日本台風の 10 月 13 日昼 (データ 15)、(j)令和元年 10 月の低気圧に伴う大雨の 10 月 26 日昼 (データ 17) のデータ。

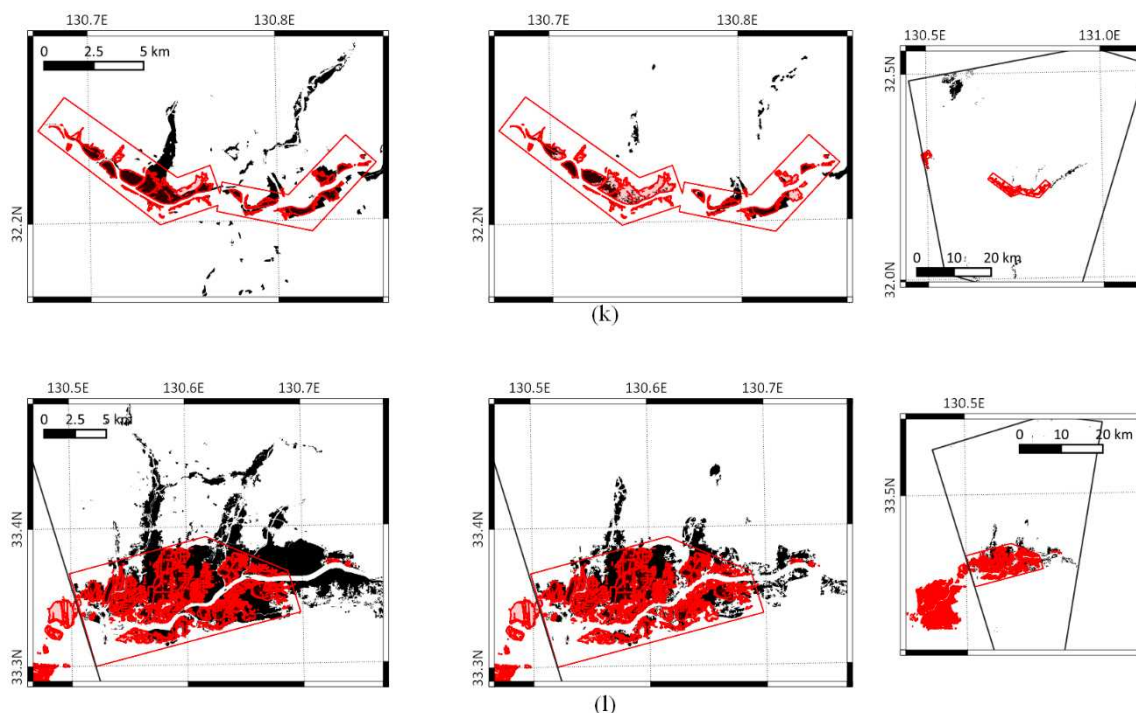


図 5-9 (続き) 令和 2 年 7 月豪雨の、(k)7 月 4 日昼の球磨川 (データ 18)、(l)7 月 7 日夜の筑後川(データ 20)のデータ。

5.4. 考察

5.4.1. 洪水面積割合シミュレーションデータの有効性

本アルゴリズムは、低空間分解能でシミュレーションに基づいた洪水の情報である TE-Japan の洪水面積割合データと、高空間分解能でかつ実際の地上の状況を反映した SAR データという、性質の異なる 2 つのデータを相補的に用いている。

洪水面積割合データを使用すると、Recall は変化が少ないが Precision が特に向上したという結果から、洪水面積割合データは未検知 (本来洪水の場所の検知漏れ) よりも誤検知 (本来洪水でない場所の過剰な検知) の削減に特に寄与していることが分かる。これは本アルゴリズムにおいて、洪水面積割合を「明らかに洪水でない領域について洪水の事前確率を下げる (事前確率を 0.5 以下とする)」目的で使用しており、洪水の起きていない地域でより誤抽出が起きにくくなっているためである。

いくつかの事例では、数字の上では精度があまり改善していないように見える。例えば、

表 5-3 のデータ 2 では洪水面積割合を使用したことでむしろ精度がやや低下している（データ 5 も、洪水面積割合を使用したことで精度がほとんど変化していない）が、画像全体を見れば検証エリア外（参照データが無い場合精度の数値には反映されない）において、誤抽出とみられる多くの偽水域が削減されている。このため、洪水面積割合を使用した効果は、実際には表 5-3 で示される数値以上に大きいと考えられる。データ 2 における精度低下は、図 5-9(a)の青丸で示したエリアで、洪水面積割合を使用しなければ検出できていた洪水が、洪水面積割合を使用したことでかえって検出できなくなっていることによる。これは、この領域で洪水面積割合の値が 0 に近く、よって事前確率も 0 に近くなり、SAR データの状況に関わらず非洪水と分類されたことが原因である。洪水面積割合は、方形の河道と台形の氾濫原からなる単純化された断面形状の水路を仮定して算出されており[103]、越水の詳細な状況や、堤防の決壊までは再現できないことから、洪水の発生を過小評価する可能性がある。また、SAR と比べ低空間解像度であることから、その影響が広範囲の画素に及ぶ。

洪水面積割合による精度向上の度合いは SAR データ側の観測条件にも依存しており、オフナディア角の大きい理想的でない観測条件に対しては特に洪水面積割合の貢献が大きかった。オフナディア角が小さいデータでは、洪水面積割合を使用しなくとも SAR データのみで 1.1.2 節で定義した本研究の目標精度（6 割程度）は達成可能だった。逆に、例えばオフナディア角の大きいデータ 6、18 では洪水面積割合が必要不可欠であり、洪水面積割合なしでは目標精度を満足することができない。

洪水面積割合を用いるもう 1 つの効果は計算時間が短縮されることであったが、その短縮の度合いもデータに依存する。画像内で洪水が少ない（洪水面積割合の小さい領域が多い）ほど、より多くの計算を省くことができ、計算時間が短縮される。例えば、データ 11 は登呂川（北見市）の局地的な洪水であり、周囲は洪水の可能性のない山地に囲まれ、計算すべき領域が少なかった。また、オフナディア角が極端に大きいまたは小さいデータは多数の微小な誤抽出が発生してポリゴン化やポリゴン形状単純化の処理を圧迫する傾向にあり、データ 18 では特に処理時間が増大した（約 30 分）が、これも洪水面積割合の使用で数分以下に抑えられた。

以上から、観測条件や洪水の発生状況にその度合いは依存するものの、洪水面積割合の使用は洪水抽出精度の向上と計算時間の短縮に有効であった。洪水面積割合の解像度（TE-Japan の場合約 1.5km）が、SAR（本研究の前処理では 5m）と比べ低いことや、シミュレーションの誤差の影響はあるが、洪水域を大まかに推定した事前情報として洪水面積割合は有効である。Today's Earth の全球版である TE-Global はより空間分解能は粗くなる（洪水面積割合については 0.25° 、約 25km 相当）ため、本アルゴリズムを海外に適用した場合さらに解像度の差はより大きな問題となりうる。より高解像度な洪水シミュレーションモデルが実現すれば、洪水抽出もより改善されると考えられる。

5.4.2. オフナディア角の影響

SAR による洪水抽出精度に影響する最も大きな要因はオフナディア角（あるいは入射角）である。実際、本研究の結果でもデータ 6（オフナディア角約 48 度）、データ 14（45 度）、データ 18（51 度）で分類精度が低かった。データ 6 における大幅な未検知（図 5-9d の青い円内）と、データ 14 において全般的に生じている不一致（図 5-9h）は、水田や畑地で発生している。オフナディア角が大きいと地表（低植生や裸地）からの後方散乱が小さく水域と区別しにくくなるうえ[28]、レンジ距離が長くなるため S/N も低下し、より洪水抽出が困難になる。後方散乱の小さい非水域と水域とを区別しにくいのは、波長が長く地面の凹凸に感度の低い L バンド SAR の特徴であり、この点においては波長の短い C バンドや X バンドの SAR が優位である。

災害前のアーカイブデータの質も精度に影響する。特に災害前のデータの観測日が古い場合、それまでに起きた洪水と無関係な土地被覆変化が誤抽出されたり、時間干渉劣化によって干渉処理の質が低下したりする懸念がある。本研究でもデータ 14、18–20 は直近の過去画像が災害から 1 年以上前である。このような長い観測間隔は、衛星システムの限界によるものである。ALOS-2 は 14 日ごとに同じパスに回帰するが、これは 14 日（1 回帰）ごとに観測データが取得されることを意味しない。ALOS-2 の観測幅は 50km（高分解能 3m モードの場合）である一方、パス間隔は約 200km（日本域の場合、緯度帯により異なる）あり、日本域を隙間なく観測するためには、回帰ごとに異なるオフナディア角を用いて少なくとも 4 回の観測を行う必要があり、予備の期間も含め 4 回帰以上（2–3 か月）の時間を要する。ALOS-2 の後継機として開発中である ALOS-4 では、高分解能モードの観測幅が 200km に拡大され、1 回帰で日本がカバーできることから、ある程度観測頻度の問題は解決する見込みである[63]。災害時の緊急観測は、その日の衛星パスと被災地の位置関係に応じて様々なオフナディア角や観測方向（衛星の昇交軌道／降交軌道、右側または左側）で行われる。ALOS-2 は、平時は 3m モードの場合ビーム 6 から 9（オフナディア 29–38 度）の右観測の観測を行っており、それ以外のオフナディア角や、左観測などの特殊な観測条件のデータは過去データがさらに少なく観測間隔が大きくあくことになる。

平時と異なる観測条件での観測では、同じ条件での過去データが全くない場合もある。この場合、強度画像については異なる観測条件データで補うが、干渉処理は同じパスのデータ（同じオフナディア角および観測方向）でなければ行うことができない。これにより、データ 9、14、17 では干渉処理ができず建物浸水の抽出には不利となった。データ 15 については干渉 SAR 用の過去データとして代用できる広域観測モードのデータがあったものの、精度や解像度は劣る結果となった。

5.4.3. その他の誤差要因

本アルゴリズムは、現時点では SAR の強度およびコヒーレンス画像が洪水時に減少し、洪水時・洪水前ともにそれらが正規分布に従うという単純な仮定を置いている。よって、これに当てはまらない変化（例えば、森林の洪水における二回反射による強度の増加）、他の多くのパラメータ（より多くの時系列的なデータ）、より複雑な分布関数（ガウス分布の重ね合わせを用いた k-means 法や、機械学習など）は精度向上のために今後取り組む価値はある。一方で、複雑すぎるモデルは計算量を増大させるほか、特に機械学習は学習時に使用したデータに特化しすぎ未知のデータに対してうまく機能しない恐れがある（汎化の限界）。

その他の誤差要因として、SAR と検証データの観測時刻の差も精度評価に影響している。データ 5、11、12、13、16、20 では両者の観測時間の差が 10 時間以上あり（詳細は表 2-1）、その間に洪水域が変化しているため、検証データと厳密に対応させることはできない。このうち、データ 5、11、13、16 は SAR 観測が洪水のピークを捉えておらず、抽出できた洪水域が検証データよりも小さい。逆にデータ 20 は SAR 観測のほうが洪水のピークに近く、検証データよりも広範囲の洪水が抽出された。データ 12（小田川洪水）については、観測の時間差は約 14 時間あるものの、谷地形に長時間安定して水が貯留される貯留型洪水であり、浸水域が維持されたために観測時間差はあっても SAR と検証データよく一致していた。

5.4.4. 既往研究との比較

本論文で解析した事例のうちいくつかについては、同じ ALOS-2 データおよび参照データを用いて浸水域抽出精度を検証した既往研究がいくつかある。常総市の水害では精度（ κ 係数又は F 値）0.6 から 0.7 程度[34][37][38][55]、倉敷市については 0.8 程度[42]、千曲市では 0.5 程度[43]が報告されている。本研究ではシミュレーションに基づく洪水面積割合など SAR 以外のデータを積極的に用いているため、必然的にこれらの既往研究よりも精度が高い傾向にある。

また、既往研究はいずれも事例研究であり、本研究のように観測条件が理想的でないものも含めこれまでの ALOS-2 水害観測データを網羅的に解析したものではない。既往研究のアルゴリズムは特定の事例に特化しているため性能が過大評価されている（他の事例に適用しにくい）可能性があるが、本研究は多くの事例を同じアルゴリズムで解析しており、汎用性・再現性が確認できている。

一方、本研究のアルゴリズムは既往研究で有効性が示されている手法のいくつかはまだ取り入れていない。本研究では高速化などの観点で最低限の過去データしか用いておらず、

時系列の強度・コヒーレンス画像の情報の利用は検討に値する。また、標高データを用いて高低差を考慮したり流出解析を行ったりすることで、地形から明らかに誤分類と考えられるものが修正できれば、より精度を高めることも可能と考えられる。また、機械学習を用いた方法も有望であるが、計算コストが大きいことや、様々な（理想的でないものを含む）観測条件に適用できるだけの汎化性能が得られていない問題があり、ここに将来の研究課題がある。

このように、本アルゴリズムは精度向上の余地はあるが、シミュレーションに基づく洪水面積割合を使用して高速化・高精度化したこと（Today's Earth を SAR の解析と組み合わせで用いたのは本研究が初である）と、処理が単純で計算が高速であり、観測条件の違いに影響されにくいロバスト性を持ち、それらの性能が多数のデータを用いて実証されている点の特長である。

5.5. 本アルゴリズムの応用

5.5.1. 本アルゴリズムの運用性の評価

本研究では ALOS-2 を用いて日本国内水害の洪水域を抽出するアルゴリズムを開発した。本節では、ここまでの結果を基に、ALOS-2 の衛星システムとしての仕様も加味して、本アルゴリズムを実際の災害で運用した場合、特に観測頻度の点でどの程度有効か机上検討を行う。

国内洪水は洪水域が急速に拡大・縮小するため、少なくとも毎日の観測、できれば1日複数回の観測が望まれる。ここまでの結果から本アルゴリズムは ALOS-2 の高分解能 3m モードのビーム番号 2-14（オフナディア角約 14-48 度に対応）において許容範囲内の誤差で洪水抽出が可能である。ALOS-2 は 14 日間で同地点の上空に戻る準回帰軌道を周回しており、この 14 日のあいだに地球を 207 回周回する（それらをパス 1 から 207 と命名している）。1.2 節に述べたように、観測領域は左右どちらかを選択可能であり、昼・夜の 1 日二回に観測の可能性がある。例として、本研究で多く取り上げた常総市（北緯 36 度、東経 140 度）を基準とすると（日本の他の地域を基準としても結果は同様である）、降交軌道（昼 12 時頃）にあつては図 5-10 のように右観測のビーム 2、5、8、11、14、および左観測のビーム 2、5、8、11、14 で当該地域を観測できることから、14 日で 10 回の観測機会がある。昇交軌道（夜 12 時頃）においても同様に 10 回の観測機会がある。表 5-4(a)に示すように、これら 10 の

ビームで観測できる機会は、14日間のサイクルの中で最低1日1回は存在する（昼・夜どちらも観測できる日も2日ある）。以上より、本アルゴリズムを用いてALOS-2で最低毎日1回の観測が可能である。

ALOS-2の後継機として、ALOS-2と同等の性能の画像がより広い観測領域で取得できるALOS-4が2020年代にALOS-2と同じ軌道面内に打ち上げられ、同時運用されることが想定される。表5-4(b)、(c)にこの2機を用いた場合に観測頻度がどの程度向上するかを2つのシナリオについて示す。すなわち、図5-11(b)のように位相角180度で運用する（両衛星を同じ軌道面内で180度離してそれぞれ飛行させる）場合と、(c)のように両衛星を位相角103度で運用する場合である。位相角180度の場合、ALOS-4はALOS-2と同じ観測パターンを7日後に繰り返す。よって観測の総数はちょうど2倍になるが、同じ時間帯に両機の観測機会が重複することが多く、表5-4(b)の2日目と9日目において昼夜どちらかに観測できない（観測可能回数が0）ギャップがあり、1日2回（昼夜1回ずつ）のモニタリングとはならない。軌道の原理から、同じパスを通過する14日回帰の2機の衛星を飛行させるときの位相角は14通り存在し（ $n/14 \times 360^\circ$ 、 $n = 0, 1, \dots, 13$ ）、103度（ $n = 4$ ）の場合には、ALOS-4はALOS-2の6日後にALOS-2と同じ観測パターンを繰り返す。総観測回数は変わらないが、この場合は観測機会がより分散され、ギャップなしに昼夜1回ずつの観測が可能となる。よって、迅速かつ高頻度なモニタリングのために、本研究では位相角103度の使用を推奨する。海外衛星の例では、欧州のSAR衛星Sentinel-1Aおよび1B衛星は災害時に緊急で観測角を変えることは目的としておらず、一定日数ごとに定点観測を行う観点から、180度の位相角を採用している。本研究で推奨した不等間隔の位相角は例えばイタリア宇宙庁のSAR衛星COSMO-SkyMedが採用している。

ALOS-2およびALOS-4の観測時刻は昼夜の12時に固定されており、さらなる観測頻度の増加には、12時以外の観測を行う軌道を周回する他の様々なSAR衛星との複合利用が必要となる。特に国内外の他のSAR衛星は6時/18時の観測が可能なdawn-dusk軌道の衛星がほとんどであり、ALOS-2/4の観測時間帯の間を埋めるのに最適である。すなわち、これらの衛星を全て併用すればおよそ0時、6時、12時、18時の6時間程度の間隔で1日4回の洪水域モニタが可能となる。表5-5に、現在運用中でデータがオープンデータ（無償）あるいは企業等を通じて有償購入可能なSAR衛星の一覧を示す。これよりもさらに短い間隔（6時間未満）での高頻度観測は、それぞれ異なる地方時の太陽同期軌道の衛星があれば可能であるが、その実現コストは大きい。別のアプローチとして、近い将来、小型化しやすいXバンドSARを搭載した小型SAR衛星が民間企業により多数打ち上げられる計画があることから、それらを利用することが考えられる。小型衛星は観測時刻の定まっていない太陽非同期軌道のものが多く、他の中・大型衛星と時刻が重複する可能性もあるものの、多数機が打ち上げられれば、中・大型衛星を補完できる可能性は高まる。よって、本研究では、将

来的に ALOS-2 のみならず、国内外の中・大型の SAR 衛星、民間企業の小型 SAR 衛星も複合的に利用して超高頻度（一日に多数回）の洪水域モニタリングを目指すことを提案する。

国内外の他の SAR 衛星は、C バンドや X バンドなど ALOS-2（L バンド）と異なる散乱特性を持つ周波数を用いるものが多く、またノイズレベルやオフナディア角などの条件もそれぞれの衛星や使用する観測モードによって異なることから、本アルゴリズムを使用するには、特に表 5-2 に示したような閾値の設定は衛星やその観測モード、オフナディア角などの条件ごとに最適な値を使用する必要がある。

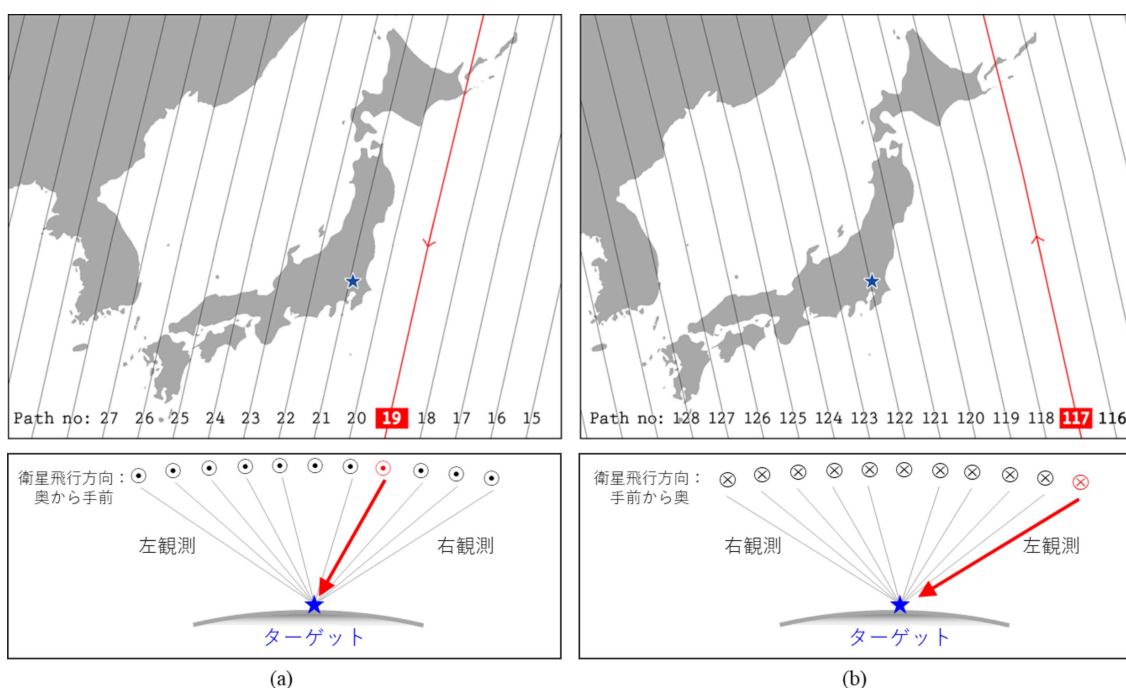


図 5-10 ALOS-2 の(a)降交軌道および(b)昇交軌道における、茨城県常総市（北緯 36° 、東経 140° 、青の星印で示す）を観測可能なパス。例えば、回帰（14日間）の1日目においては、赤字で示す降交軌道のパス 19 から右観測（オフナディア角 25.6° ）、昇交軌道のパス 117 から左観測（オフナディア角 48.0° ）で観測可能である。

表 5-4 本アルゴリズムで洪水抽出が可能な観測機会の数。(a)ALOS-2 のみ（あるいは ALOS-4 のみ）の場合、(b)ALOS-2 と 4 を位相角 180°で同時運用、(c)ALOS-2 と 4 を位相角 103°で同時運用、の 3 つのケースの比較。

ケース		日	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	計
(a) ALOS-2 のみ	降交軌道		1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	10
	昇交軌道		1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	10
(b) ALOS-2 と 4 (位相角 180°)	降交軌道		2	0	2	1	2	2	1	2	0	2	1	2	2	1	20
	昇交軌道		1	2	0	2	1	2	2	1	2	0	2	1	2	2	20
(c) ALOS-2 と 4 (位相角 103°)	降交軌道		2	1	1	1	2	2	2	1	1	1	2	1	2	1	20
	昇交軌道		1	2	1	1	1	2	2	2	1	1	1	2	1	2	20

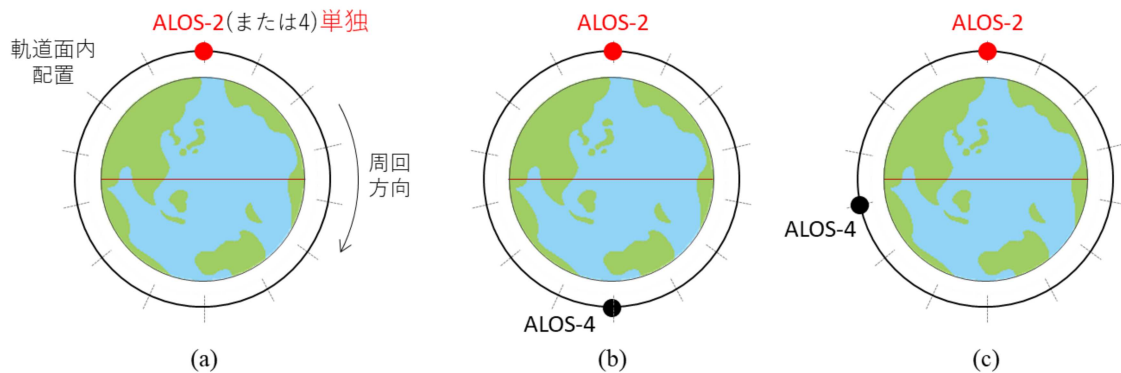


図 5-11 本研究で検討を行った ALOS-2 および ALOS-4 の軌道面内配置の 3 つのケース。(a) ALOS-2（または 4）を単独で運用する場合、(b) ALOS-2 と ALOS-4 を同じ軌道面内で 180°の位相角で同時運用する場合、および(c) ALOS-2 と ALOS-4 を同じ軌道面内で約 103° (360+4/14°) の位相角で同時運用する場合。

表 5-5 洪水域把握に利用可能と考えられる運用中の SAR 衛星。

周波数帯	Lバンド	Cバンド	Xバンド
衛星*	- ALOS-2 (0時/12時) - SAOCOM-1A/1B	- RADARSAT-2 - Sentinel-1A/1B - RADARSAT Constellation	- COSMO-SkyMed 1/2/3/4 - TerraSAR-X/TanDEM-X - ASNARO-2 - Paz - COSMO-SkyMed Second Generation - その他商用衛星

*観測地方時は、ALOS-2 以外は 6 時/18 時。

5.5.2. 浸水深の推定の試行

浸水域のみならず、浸水の深さを推定できれば様々な用途に用いられる非常に有用な情報となる。例えば浸水深 50cm を超える領域では、車両が通行できず救助活動が困難となるおそれがあり、その領域を早期に把握することが必要である。また、浸水深はライフラインの被害とも密接に関連しており、日本国内の洪水事例の分析によれば浸水深 50cm 程度から徐々にライフラインが停止し、1m を越えると電気設備の浸水などにより停電（高層階においては水道もポンプ停止のため断水）に至り、2m を越えると都市ガスなど比較的堅牢なライフラインも停止する[108]。浸水深が把握できれば排水すべき水の体積も求めることができることから、排水ポンプ車の配置や運用にも役立つ情報となる。平成 27 年 9 月関東・東北豪雨においては、湛水量の推定に時間を要し、被災地の迅速な復旧のためのポンプ車の配置計画の立案が課題となっていた[109]。床上浸水の基準である浸水深 50cm を超えると家屋の被害も甚大となり、被害額の推定にも必要な情報となる[110]。

平成 27 年 9 月関東・東北豪雨においては、佐山らが災害後に現地調査を基に浸水深分布を作成した[111]。これは次のような方法で算定されたものである：①高性能 GPS や測距器具を用いて建物の壁などに残る浸水痕跡から浸水位（浸水面の標高）を各地で精密に測定する、②それらの地点データを IDW（Inverse Distance Weighted）法により空間内挿して浸水深分布（画像）を作成、③その浸水位分布から標高データ（国土地理院基盤地図情報の 5m 解像度数値標高モデル）を差し引くことにより浸水域を求める、という方法である。これらの現地調査による各地点の浸水深、および作成された浸水深分布データは一般公開されており[112]、図 5-12(a)に各地点の浸水位と空間内挿された浸水位を、(b)に算定された浸水深を明示する。

この現地調査は災害後に行われた事後調査であり、本研究では、これまで述べてきた ALOS-2 による自動浸水域抽出結果を利用し、災害対応に用いることができるよう即時的かつ自動的に浸水深を推定する手法を検討した。SAR による推定浸水域から浸水位（浸水深の推定のために必要）を推定する方法としては、浸水面を水平と仮定し、推定浸水域の外縁の標高値を浸水位とする方法が考えられる（Liu らが試行している例がある[42]）が、この手法を用いることができるのは小さな浸水域や、川の断面に沿った狭い領域での解析に限られ、広域にわたる洪水では浸水面にも勾配があるため、水平の仮定はできない。そこで金城らは SAR による推定浸水域の外縁（ポリゴンの外側 10m 程度）の標高値を前述の佐山らによる方法のように IDW 法で空間内挿し、2 次元的な浸水位分布を作成している[113]。

本研究では、本章で既に述べた ALOS-2 による自動浸水域抽出結果を利用し、その外縁から概ね 20 ピクセル（100m）程度の間隔で標高値を取得し、それらを IDW 法により空間内

挿入した。なお、既往研究とは異なり、本研究では画像全体に対して浸水位を推定するのではなく、抽出した各浸水域のポリゴンごとに独立してポリゴン外縁の標高値の取得とポリゴン内の浸水位の空間内挿を行った。これにより、近接しているが異なる地盤高にある浸水域（河川の左岸側と右岸側で浸水位が異なるなど）があっても互いに影響することなく浸水位が求められる。

図 5-12(c)に 2015 年 9 月 11 日の ALOS-2 データ（データ 3）から推定した浸水位分布と標高値を取得した地点、(d)にその浸水位と標高との差分により求めた浸水深を示す。現地調査に基づく浸水深分布(b)と ALOS-2 による推定浸水深分布(d)を比較すると、そもそもの浸水域が、現地調査(b)はピーク時の浸水域であるのに対し、ALOS-2 は(d)北部は水が引き南部のみ湛水が続いている状態のためやや水位は低下している。(e)、(f)は同様の方法により、9 月 13 日夜の ALOS-2 データ（データ 5）、9 月 16 日昼の ALOS-2 データ（データ 9）から得られた浸水深を示す。(b)、(d)、(e)、(f)の順に、浸水域とともに浸水深も減少していく過程が分かる。図 5-13 に、佐山らの現地調査に基づく水位計測点における浸水深に対して、9 月 11 日の ALOS-2 データに基づく浸水深を比較して検証したものを示す。 $R^2=0.65$ （相関係数約 0.8）の比較的良い相関が得られているが、前述のように ALOS-2 観測時点では水位が低下しているため、全体として 0.5m 程度低い浸水深が推定された。水位の違いによるバイアスはあるものの、回帰直線からのばらつきは 1m 程度以内に抑えられている。なお、ここでは佐山らによる浸水位計測点 133 点のうち、ALOS-2 で 0.1m 以上の浸水深が推定されている 20 点のみをプロットし、検証している。

以上から、ALOS-2 で 1m 程度の精度で浸水深が抽出できる可能性が示された。現地調査に基づく（ピーク時の）浸水深とは異なり、ALOS-2 データから得られた浸水深は ALOS-2 の観測時刻におけるスナップショットの浸水深であり、最大浸水深よりも必ず低く見積もられる。したがって、最大浸水深の数値が必要である被害額の推定等に直接用いるには注意が必要である。一方で、救助活動やポンプ車の配置計画など、現在の浸水深が必要なシーンでは ALOS-2 のスナップショットの浸水深が役立つと考えられる。夜間も観測可能な ALOS-2 により、浸水深の準リアルタイムかつ時系列的な推定を行い、災害対応に役立てることが期待される。

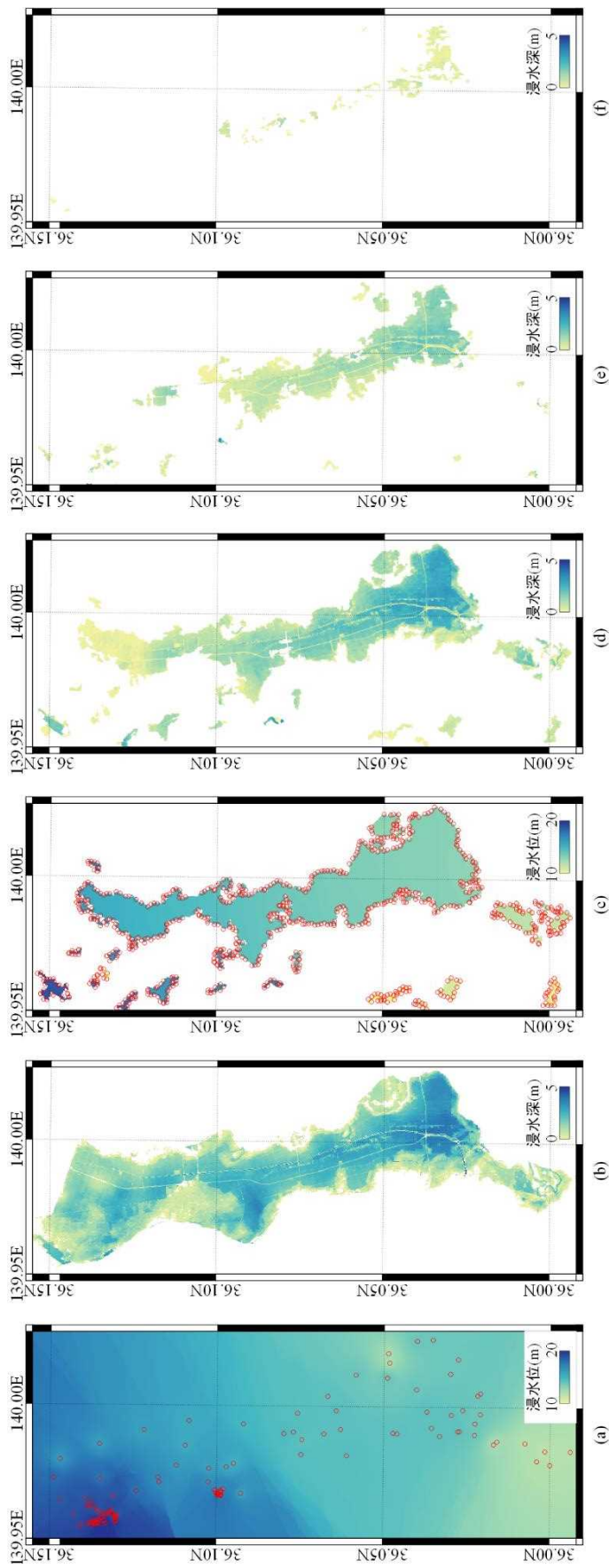


図 5-12 (a)現地調査に基づく浸水位分布（佐山らの公開データに基づく）、(b)(a)から得られた浸水深分布、(c) ALOS-2 データ（2015 年 9 月 11 日）により推定した浸水位分布、(d)は(c)から得られた浸水深分布。(a)(c)内に赤色の点で示すのは浸水位の取得に使用した地点を表し、(a)では佐山ら [112] が当該地点で現地調査により浸水位を計測、(c)では ALOS-2 による推定浸水域の外縁の点を抽出しその DEM 標高値を浸水位とした。(e)と(f)は、(d)と同様の方法により 9 月 13 日夜、9 月 16 日昼の ALOS-2 データから得られた浸水深分布。

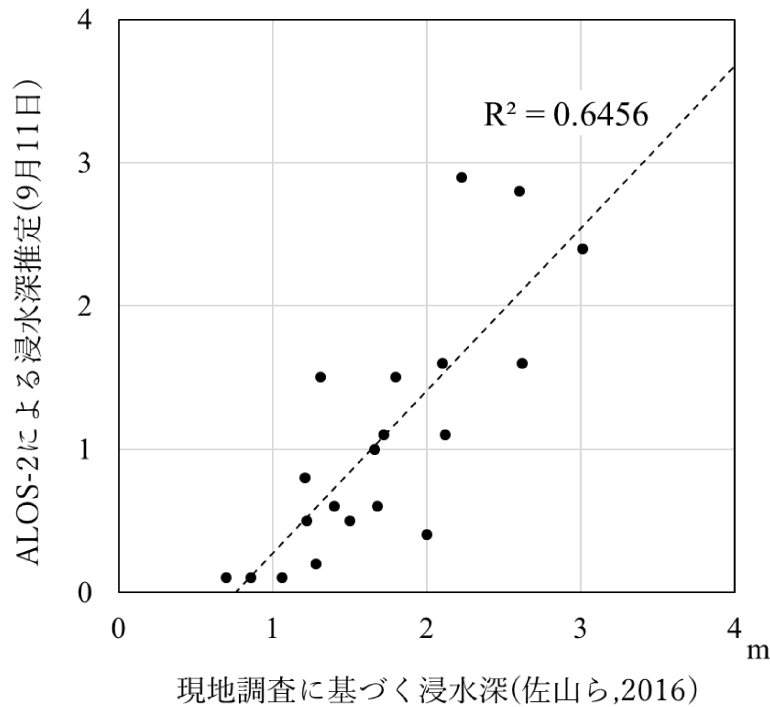


図 5-13 平成 27 年 9 月関東・東北豪雨の ALOS-2 観測データ（2015 年 9 月 11 日）による推定浸水深と、現地調査に基づく浸水深[112]との比較。ALOS-2 観測時は洪水のピークを過ぎていたため、やや水位が低く推定されている。

5.6. 本章の結論

本研究では、ALOS-2 による SAR データと TE によるシミュレーションデータとを相補的に使い、全自動で、高速で、かつロバストな洪水域抽出アルゴリズムを開発した。SAR の強度とコヒーレンス、それにシミュレーションによる氾濫面積割合というそれぞれ性質の異なるデータを融合するために、ベイズ推定および各種フィルタ等を用いて洪水を抽出した。精度検証は、日本国内の 7 つの水害における、観測条件が異なるのべ 15 の ALOS-2 観測データを用いて網羅的に行い、次の結論を得た。

- 洪水シミュレーション（洪水面積割合）データは洪水抽出精度の向上に寄与しており、SAR データのみを使用している過去の研究よりも高い精度を得ることができた。ただし、精度はオフナディア角（左右観測それぞれ $14\text{--}48^\circ$ のオフナディア角が望ましい）や、同観測条件の災害前アーカイブデータの量（ALOS-2 のアーカイブの取得状況の多さも加味すると観測条件は右観測の $29\text{--}38^\circ$ オフナディア角が望ましい）に依存する。

- 洪水シミュレーションを用いると、洪水の発生可能性が著しく低い領域は処理を不要とすることができるため、計算時間の短縮にも効果的だった。計算時間は、ALOS-2 の高分解能 3m モードデータ全体 (約 50km 四方) の処理が、本研究で目標とした 1 時間以内を下回る、30 分以下である。
- 本アルゴリズムはロバストであり、上記の幅広いオフナディア角 $14\text{--}48^\circ$ の範囲に対応し、災害前後でオフナディア角等の観測条件が異なる事例、災害前後の観測期間が大きく離れている事例にも、許容できる誤差 (目標精度 6 割程度) で洪水抽出ができた。
- 本アルゴリズムを用いることで、ALOS-2 による最低 1 日 1 回の洪水域把握が可能となる。さらに後継機の ALOS-4 が打ち上げられ同じ軌道面内で同時に運用された場合、一日 2 回 (昼夜 1 回ずつ) の洪水域把握が可能となる。なお、毎日昼夜 1 回ずつの洪水域把握を確実にするには、2 機の衛星の間隔 (位相角) は約 103° が推奨される。さらに、6 時頃と 18 時頃に観測を行う他の多くの SAR 衛星を併用すれば 1 日 4 回 (約 6 時間間隔) の洪水把握が可能である。

これらの結果から、本アルゴリズムは、1.1.1 節に述べた本研究の目標 (計算時間、観測頻度、精度等) を全て満たす。また、ALOS-2 のこれまでの国内水害のほぼ全ての観測事例で検証しており、使用しているシミュレーションデータも日本全国で準リアルタイムに入手可能なデータであることから、その汎用性が実証できている。

現在の課題としては、現状では考慮していない他の多くの変数をアルゴリズムに取り入れる余地がある。現状のアルゴリズムでは、計算の単純化と高速化のため、限られた数の変数 (災害前の強度、災害時の強度、コヒーレンスの差の 3 つ) を、正規分布の確率分布関数と仮定し、単純なベイズ推定を用いて洪水域を推定している。例えばより多くの強度やコヒーレンスの過去の時系列データ、第 4 章で有効性が示された位相統計量などは取り込む余地がある。また、このように変数の数を増やし、それらの複雑な変化 (例えば強度が洪水によって減少する場合と増加する場合も両方考慮する必要がある) を考慮することになれば、現状の単純な分布関数の仮定は困難であり、機械学習などより複雑な問題を扱えるモデルを採用することも有望であるが、計算コストが大きいことや、様々な (理想的でないものを含む) 観測条件に適用できるだけの汎用性能が得ることが課題である。TE-Japan による洪水面積割合の解像度が、SAR と比べ低いことが精度に影響していることから、より高解像度かつ高精度な洪水シミュレーションモデルが実現すれば、洪水抽出もより改善されると考えられる。

本研究の手法はパラメータ等の調整で ALOS-2 以外の SAR 衛星の利用や海外の洪水にも対応できる拡張性、汎用性を持っており、それらの実現も今後の課題である。日本の洪水は領域が比較的小さく、急速に拡大し短時間で水が引くものが多い。一方で、世界の洪水はより時空間スケールの大きいものもあり、スケールに合ったデータ、例えば ALOS-2 の広域観

測モードを利用することが考えられる。また、本研究は現時点では森林等の植生浸水を考慮していないが、海外の洪水ではよく発生するためこれらを考慮する必要がある。本研究では日本の災害の観測頻度が高い ALOS-2 搭載の L バンド合成開口レーダを扱ったが、さらなる高頻度化や海外の水害への対応のために他の合成開口レーダ衛星を活用するにあたっては、閾値などのパラメータをそれぞれの衛星データの特徴（周波数、オフナディア角、ノイズレベル等）に応じて調整する必要がある。

本研究で、日本域の洪水に対して ALOS-2 で 1 日 1 回以上の頻度で洪水域把握が可能となることが実証された。今後は、さらなる精度向上に加えて、本アルゴリズムを実用に供するため、自動処理システム（JAXA の整備する防災インターフェースシステムなど）内に本アルゴリズムを構築し、実際の災害時に運用することも必要である。

第6章 総括と今後の展望

6.1. これまでの課題と本研究が目指した目標 (第1章 – 第2章)

洪水は世界中で最も多発している災害であり、気候変動による豪雨の増加や経済発展による都市化の進行などにより今後もその被害は増大する見込みである。その防災・減災に資するために遠隔的に災害状況を把握できる衛星リモートセンシングは必要不可欠である。日本国内では、特に時空間スケールの小さな洪水が多く、高分解能、迅速、高頻度、高精度な洪水モニタリングへのニーズが強いが、これら全てを実現する手段は確立していない。

高分解能、迅速、高頻度、広域の観測には、昼夜や天候に影響されずに地表の画像を取得できる合成開口レーダ (SAR) が有望である。宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が開発・運用する陸域観測技術衛星 2 号 (ALOS-2) は、高分解能の L バンド SAR を搭載し、緊急時には特定の被災箇所を 1 日 1 回以上の頻度で観測可能である。近い将来に達成すべき大目標は多くの SAR 衛星を用いた国内外の水害の洪水域のモニタリングを実用化することであるが、その中でもまず取り組むべき課題として、本研究では ALOS-2 による洪水域抽出について多面的な検討を行い、その実用化を目指した。

具体的な目標としては、ユーザーニーズを満たすアウトプットを出すために高空間分解能 (10m 程度)、迅速 (1 時間以内に処理可能)、高精度 (観測条件が悪くても 6 割以上の精度を確保)、かつ高頻度のモニタリングが可能 (幅広いオフナディア角に対応することにより 1 日 1 回以上の頻度で洪水域を抽出) なアルゴリズムを開発することとした。これらの実現のために、強度画像による完全冠水型の洪水抽出と、干渉性を利用した建物浸水抽出について、それぞれ ALOS-2 の実データの解析や、必要に応じて理論的な検討を行い、洪水抽出に適した条件や閾値、抽出精度を明らかにすることとした。さらに、洪水シミュレーションデータ等を組合せ、抽出の自動化、高精度化、高速化を図った。また、発展的な課題として、浸水域の面積変化などのダイナミズム把握や浸水深の推定も行うこととした。

6.2. 強度画像による完全冠水 (非建物) 洪水抽出の総括 (第3章)

衛星の飛行経路と被災地の位置関係は毎日変化するため、高頻度でモニタリングを行うには日々異なる様々な入射角で観測を行わなければならない。これまで、L バンド SAR で

幅広い入射角による観測データでの洪水域抽出の可否やその精度、最適な閾値などは網羅的に検証されておらず、ALOS-2 で実用的な日単位での洪水モニタリングができるかは不明であった。そこで本研究では、平成 27 年 9 月関東・東北豪雨で ALOS-2 が取得した入射角や偏波などが異なる洪水観測データを活用し、それらの様々な観測条件に対する洪水域抽出の精度や閾値を初めて網羅的に明らかにした。

本研究により、50 度程度までの幅広いオフナディア角が使用可能であり、ALOS-2 一機の衛星でも許容範囲内の抽出誤差で高頻度（1 日 1 回以上）な洪水域の抽出が可能であることが示された。ALOS-2 の観測モードは分解能の高い高分解能 3m モードが最適で、偏波は最も取得頻度の高い HH 偏波で問題ないことも分かった。また日毎の洪水域抽出結果が得られたことから、応用として、その一連の時系列データから浸水面積の変化を把握すること、それを時間的に補完・補外すること、および浸水継続日数を推定することも可能であり、浸水域のダイナミズムの把握にも使用できる可能性が示された。

6.3. 干渉処理画像による建物域の洪水抽出の総括（第 4 章）

洪水は地物が完全に水没し表面が水面となる完全冠水と、建物の床上・床下浸水（建物が完全に水没はしない状態）では SAR 画像上での見え方が異なる。従来、建物浸水は完全冠水と比較して建物からの強い反射が原因で浸水域の抽出が十分な精度でできていなかった。そこで本研究では、SAR 干渉処理で得られるコヒーレンスと位相統計量が有効であると考え、その閾値や精度、理論的な背景をシミュレーションおよび実際の洪水を観測した ALOS-2 による SAR 観測データで示した。その結果、コヒーレンスと位相統計量はいずれも建物洪水の抽出に有効であるが、やや異なる性質があることを明らかにした。ポイント状ターゲットではコヒーレンスよりも位相統計量の方が建物浸水抽出に有効であった。一方で、分布状ターゲットにおいては、位相統計量はややノイズが多く、位相フィルタにより位相のノイズを低減させる必要があるため、計算量の増加や解像度の低下に注意する必要がある。なお、強度画像（二回反射）を用いて抽出する方法は有効ではなかった。

本研究により、建物浸水については、強度画像よりも電波の位相情報を用いた干渉処理が有効であることが確認でき、その閾値や精度が明らかとなった。また、従来災害抽出で良く使われてきたコヒーレンスについて、ポイントターゲットにおいては注意して使用すべきであり、代わりに位相統計量を用いることが有効であることを初めて示した。

6.4. 洪水シミュレーション等を併用した自動洪水推定の総括 (第5章)

既往研究の手法は、本研究で対象とする日本国内のユーザのニーズに対して、分解能は十分満足するが、処理の迅速性や観測頻度の点では充足しておらず、実用化に向けた課題となっていた。そこで、これまでの知見を統合し、建物・非建物域を含む洪水域を高速・高精度で抽出可能な自動処理アルゴリズムを開発した。このアルゴリズムにおいては、Today's Earth で提供されている気象・河川モデルに基づく準リアルタイム洪水シミュレーションデータを初めて SAR の解析と組み合わせて使用し、高速化、高精度化を図った。

過去の7つの水害事例の延べ15回のALOS-2観測データを用いてテストを行い、国土地理院による推定浸水域図を用いて精度を検証した結果、本アルゴリズムによる洪水域の抽出精度は最悪値で6割、最高値で9割、平均的には7割程度であった。SARに期待される役割は、天候や時間帯に依存しやすい光学画像や現地調査などの手段を待たずに最も早い情報を提供することであり、上記の精度は速報としては十分なものである。また、抽出した洪水域と標高データを組み合わせることにより、浸水深も1m程度の精度で推定できた。計算時間は1シーン(約50km四方)30分以下であった。実際の衛星運用の実態を踏まえた運用性の評価も行い、ALOS-2を用いて本アルゴリズムで洪水抽出を行った場合に最低1日1回(昼夜どちらか)、ALOS-2および後継機のALOS-4を同時運用した場合には1日2回の洪水把握が可能であるとの結果を得た。なお、毎日昼夜1回ずつの洪水域把握を確実にするには、2機の衛星の間隔(位相角)は約103°が推奨される。これらの精度、計算時間、観測頻度は6.1節に示した目標を全て充足するものである。

本研究の成果を用いると、ALOS-2を用いて洪水を高頻度かつ迅速にモニタリングできるようになる。日本国内で多い、時間スケールの短い洪水も高い確率で捉えることができ、長時間続く洪水に対してはその日々の変化も把握することができるようになる。これらは、人命救助、排水作業、インフラ等の被害把握と復旧、災害後の復旧計画など、初動から復旧フェーズまでの災害対応の様々な場面に対して有用な情報となる。

6.5. 今後の展望

6.5.1. 本研究の拡張：海外衛星の利用や海外洪水への対応

本研究は観測手段としては日本のSAR衛星であるALOS-2を用い、解析対象としては日

本国内の災害を扱った。将来的には、ALOS-2の後継機であるALOS-4を用いるとより高頻度（昼12時、夜12時の1日2回）の洪水把握が可能となる。海外のSAR衛星も複合利用できれば、異なる時間帯（6時、18時）のデータや、強度画像による水面の判別が容易なX、Cバンドなどデータが得られるため、さらなる高頻度化、高精度化が見込まれる。本研究のアルゴリズムを異なるSAR衛星に適用するには、閾値などのパラメータをそれぞれの衛星データの特性（周波数、オフナディア角、ノイズレベル等）に応じて調整する必要がある。

また、本研究を国外の災害にも適用できれば、世界的に増加する水害に対してその減災に貢献できる。世界の洪水はより時空間スケールの大きいものが多く、スケールに合ったデータ、例えばALOS-2の広域観測モードを利用することも考えられる。また、本研究は現時点では森林等の植生浸水を考慮していないが、海外の洪水ではよく発生するためこれらを考慮する必要がある。

6.5.2. 本研究の実用化と高精度化

本研究の今後の展開として、洪水抽出精度のさらなる向上と、（まずは現状の精度での）実用化が挙げられる。

現状の本研究の解析手法は、SARデータの振る舞いをよく理解する（機械学習などブラックボックスになりやすい複雑なモデルを用いない）ことと、実用化を見据えた計算の高速化のため、比較的単純な手段を用いている。限られた数の変数（災害前の強度、災害時の強度、コヒーレンス差など）を用いて、閾値処理や、正規分布を仮定したベイズ推定など比較的単純な手法を採用した。既往研究ではSARのより豊富な時系列過去データや、機械学習を使用して高い精度を得たものがあるが、これらは本研究ではまだ取り入れていない要素であり、取り入れれば精度向上の余地がある。精度向上と計算時間とはトレードオフの関係があり、目的に応じてバランスをとる必要がある。

また、第5章において用いた洪水面積割合のシミュレーションデータは、ALOS-2と空間解像度の乖離があり、より高解像度かつ高精度な洪水シミュレーションモデルが実現すれば、洪水抽出もより改善されると考えられる。

一方で、本研究のアルゴリズム（特に第5章で開発したもの）は現状で計算が高速かつユーザーニーズを満たす最低限の精度が確保できており、ALOS-2による観測後速やかに処理しユーザに提供できるよう、このアルゴリズムを現在の研究用環境からALOS-2/ALOS-4データのリアルタイム処理が可能な実運用システム内に実装していくことが望まれる。

付章

付章 A

偏波 SAR 解析

ALOS-2 のデータの一部は四偏波モードで取得されており、第 3 章ではこれを利用して、各偏波の洪水抽出結果を比較した。四偏波データからは、HH、HV、VV の強度画像が得られる。なお VH 偏波は、本研究で用いる標準プロダクトは予め偏波校正がなされているため [78] 相反性 (reciprocity) から HV と等価と考えられるため使用しなかった。四偏波データは偏波散乱特性を完全に記述可能であり、観測時には水平・垂直偏波の直線偏波基底のデータが取得されるが、他のあらゆる偏波のデータも基底変換により数学的に変換である。ここでは、パウリ基底の HH+VV、HH-VV 偏波 (それぞれ表面散乱、二回散乱に概ね対応)、および円偏波基底の LL、RR 偏波 (L・R は左・右円偏波の意) のデータも比較の対象とし、それぞれについて強度画像を作成した。各偏波の信号 S_{XY} は、元の直線偏波基底のデータ S_{HH} 、 S_{HV} 、 S_{VV} から次のように求められる [114]。

$$\begin{cases} S_{HH+VV} = \frac{1}{\sqrt{2}}(S_{HH} + S_{VV}) \\ S_{HH-VV} = \frac{1}{\sqrt{2}}(S_{HH} - S_{VV}) \\ S_{LL} = \frac{1}{2}(S_{HH} - S_{VV} + 2jS_{HV}) \\ S_{RR} = \frac{1}{2}(S_{VV} - S_{HH} + 2jS_{HV}) \end{cases}$$

これらはいずれも複素数の信号データであることに注意を要する。これらを後方散乱係数に変換するには式(3-1)の I、Q に実部、虚部をそれぞれ代入する。

第 3 章の結果では、データによっても優劣が異なったが、基本的には表面散乱を捉える HH 偏波や HH+VV 偏波等を用いれば問題ないとの結論となった。現実の災害観測では、分解能、観測幅が優れる HH 偏波のみによる単偏波観測が多いことから、第 4 章、第 5 章においては HH 偏波のデータのみを使用した。

多偏波データがより有効なのは土砂災害 (土砂崩壊地および崩壊土の堆積地) の抽出であ

る。詳しくは論文(4)で報告しているが、その解析結果について以下に概略を述べる。

土砂災害抽出への応用

本検討では表 A-1 のデータを用いて、土砂災害箇所の抽出を行った。平成 29 年(2017 年)九州北部豪雨による土砂災害と、平成 30 年(2018 年)北海道胆振東部地震による土砂災害の、豪雨と地震という異なる原因による土砂災害データをそれぞれ使用し、国土地理院による判読図を参照データとして精度検証を行った[115][116]。土砂災害は洪水と異なり傾斜地で発生し、後方散乱の変化のしかたも斜面の向きなどによって異なり単純な推定ができないことから、ここでは機械学習を用いて、SAR データから土砂災害域を抽出した。用いたパラメータは、①偏波 SAR 解析から得られる情報として災害前・後のパウリ成分(HH+VV 偏波、HH-VV 偏波、HV 偏波)、②干渉 SAR 解析から得られる情報としてコヒーレンス(4-1)と干渉 SAR 位相標準偏差(4-2)、および③DEM から得られる地形に関するパラメータとして、局所入射角(SAR の電波の入射方向と斜面の法線のなす角で、これによって土砂災害の見え方が大きく変わる重要なパラメータである[117])、傾斜、曲率(いくつかの定義があるが、土砂災害に特に感度が高いとされる平均曲率を使用[118])である。機械学習の手法としてはランダムフォレスト法[119]を用い、上記の偏波 SAR、干渉 SAR、地形解析の各パラメータを入力とし、土砂災害であるかどうかを出力する学習モデルを作成した。学習と検証には参照データをそれぞれ半分ずつ用いた。

検証の結果を表 A-2 に示す。表 A-2 の#1-8 は異なる解析パラメータを機械学習に入力した場合の比較であり、偏波、干渉、地形を全て用いた場合に精度が最も高く、偏波+干渉、偏波+地形、偏波のみ、の順に精度は低下する。特に、局所入射角が大きい($>30^\circ$)の精度低下が著しく、様々なパラメータを組み合わせることの重要性を示している。#9、#10 は、学習データと検証データを異なる災害からとった場合であり、特に地震のデータで学習したモデルで豪雨による土砂災害を検知しようとした#10 は精度の低下が著しかった。#11-14 は偏波について、4 偏波データよりも観測機会の多い二偏波(HH と HV)、単偏波(HH のみ)の場合の比較で、特に単偏波では精度が大きく低下した。

抽出された土砂災害箇所を、いくつかのケースについて参照データの比較と共に図 A-1、図 A-2 に示す。顕著な誤検知として、九州北部豪雨の事例では、森林伐採が伐採され土砂が露出している領域が土砂災害と散乱特性が類似しており誤って検出された(図 A-1)。この事例では災害前の過去データが約 1 年前のものであることから、その間の土地被覆変化の影響を受けやすい。一方で、北海道胆振東部地震では、災害前後のデータの時間間隔が短いためこの影響を受けなかった。

このように、洪水と比較して土砂災害の抽出においては偏波解析の有効性が顕著であり、少なくとも2偏波(HH+HV)、できれば4偏波(全偏波)での観測が望ましいとの結論が得られた。土砂災害のほか、災害(原子力発電所事故)による耕作放棄地なども同様に偏波数が多いデータが有効だった(詳細は論文(2)で報告した)。また、干渉処理、地形パラメータも精度向上に寄与する。災害前のデータが古いと土地被覆変化が災害として誤検知されやすいことや、機械学習は学習データに依存して精度が大きく変わることなどには注意を要する。

表 A-1 本検討で解析した ALOS-2 四偏波モードデータ。

災害事例	観測日		時間 間隔	垂直 基線長	観測 方向*	オフ ディア角
	災害後	災害前				
平成 29 年九州北部豪雨	2017-07-13	2016-08-11	336 日	47 m	A/R	30.9°
平成 30 年北海道胆振東部地震	2018-09-08	2018-08-25	14 日	69 m	A/R	28.4°

*A/R：昇交軌道、右観測

表 A-2 ALOS-2 の種々の条件の解析データを用いて検証した、土砂災害の抽出精度。

#	使用したパラメータ*1	データ*2		精度 (κ)			精度 Recall	精度 Precision
		学習用	検証用	入射角<30	入射角>30	全体		
1	偏波 (四偏波、以下同)	豪雨	豪雨	0.643	0.376	0.474	0.378	0.918
2	偏波	地震	地震	0.663	0.577	0.606	0.512	0.946
3	偏波+地形	豪雨	豪雨	0.671	0.411	0.508	0.419	0.894
4	偏波+地形	地震	地震	0.660	0.561	0.594	0.494	0.958
5	偏波+干渉	豪雨	豪雨	0.708	0.552	0.605	0.502	0.962
6	偏波+干渉	地震	地震	0.716	0.634	0.661	0.577	0.941
7	偏波+干渉+地形	豪雨	豪雨	0.738	0.608	0.653	0.566	0.935
8	偏波+干渉+地形	地震	地震	0.733	0.656	0.682	0.616	0.913
9	偏波+干渉+地形	豪雨	地震	0.480	0.670	0.591	0.811	0.599
10	偏波+干渉+地形	地震	豪雨	0.240	0.279	0.266	0.188	0.958
11	二偏波+干渉+地形	豪雨	豪雨	0.678	0.518	0.573	0.468	0.959
12	二偏波+干渉+地形	地震	地震	0.565	0.483	0.510	0.405	0.964
13	単偏波+干渉+地形	豪雨	豪雨	0.659	0.435	0.513	0.399	0.990
14	単偏波+干渉+地形	地震	地震	0.520	0.189	0.305	0.226	0.915

*1 偏波：四偏波の場合は災害前後の HH+VV、HH-VV、HV 偏波、二偏波の場合は HH、HV 偏波、単偏波の場合は HH 偏波) データ、干渉：HH 偏波のコヒーレンスおよび位相標準偏差、地形：局所入射角、傾斜、曲率を使用。

*2 豪雨：平成 29 年九州北部豪雨のデータ、地震：平成 30 年北海道胆振東部地震のデータ。

森林伐採の誤抽出

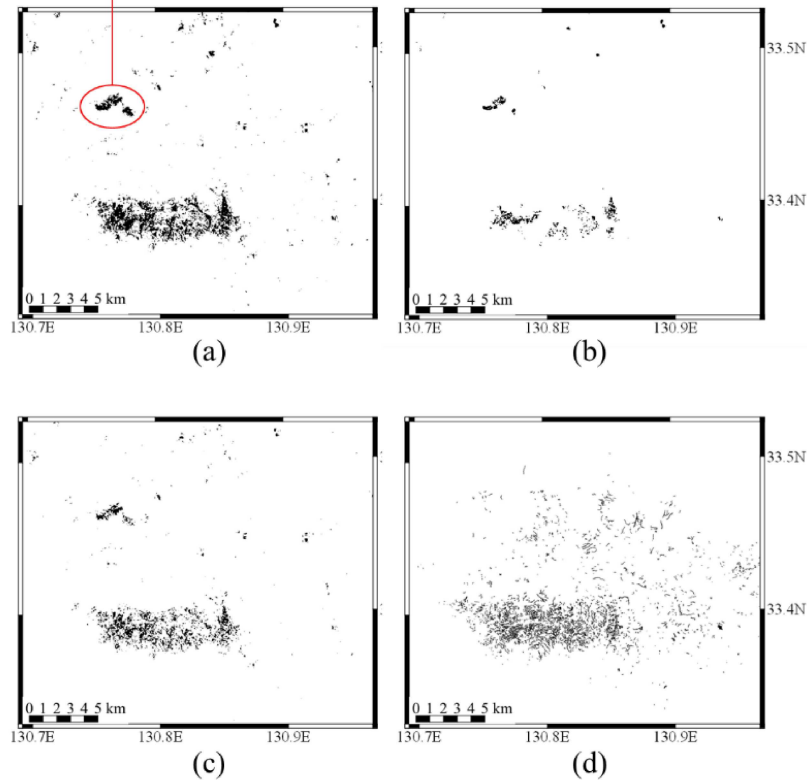


図 A-1 ALOS-2 の偏波解析、干渉解析、地形データの解析により抽出した平成 29 年九州北部豪雨による土砂災害。(a)四偏波、干渉、地形データの全パラメータを使用した場合 (表 A-2 の#7)、(b)異なる事例で学習した場合 (表 A-2 の#9)、(c)単偏波の場合 (表 A-2 の#13)、および(d)比較として、国土地理院の判読図に基づく参照データ。

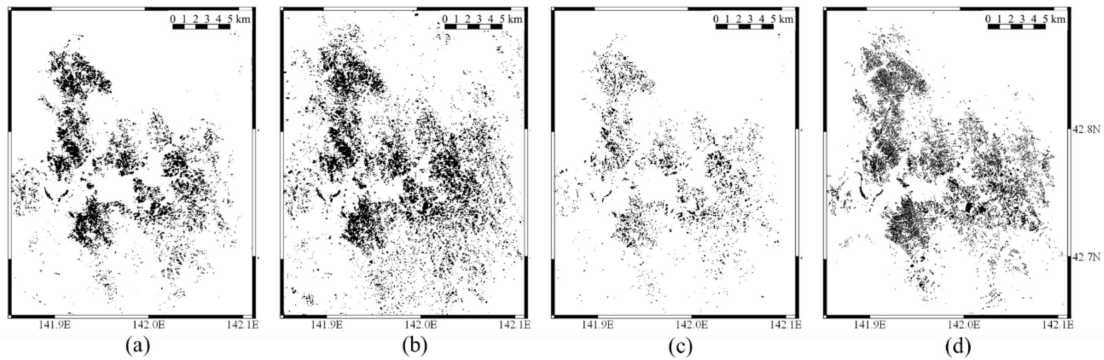


図 A-2 ALOS-2 の偏波解析、干渉解析、地形データの解析により抽出した平成 30 年北海道胆振東部地震による土砂災害。(a)四偏波、干渉、地形データの全パラメータを使用した場合 (表 A-2 の#8)、(b)異なる事例で学習した場合 (表 A-2 の#10)、(c)単偏波の場合 (表 A-2 の#14)、および(d)比較として、国土地理院の判読図に基づく参照データ。

付章 B

洪水域抽出のためのヒストグラムマッチング法

第 5 章の自動洪水抽出アルゴリズムでは、災害前後のコヒーレンス γ_{co} 、 γ_{pre} の差 $\Delta\gamma = \gamma_{co} - \gamma_{pre}$ を用いて洪水抽出を行ったが、コヒーレンスは、洪水による地表面の状態変化だけでなく、コヒーレンス計算に使用した 2 データの時間差（時間ベースライン）、軌道差（空間ベースライン）、ノイズなど多くの要因による相関劣化によっても変化する[83]。ALOS-2 の場合、観測の時間間隔が長い（2 週間～1 年程度）ため時間相関劣化が特に顕著である。これらの、洪水以外の要因によるコヒーレンス変化が差になるべく含まれないよう、差をとる前に災害時コヒーレンス画像 γ_{co} の明るさを災害前コヒーレンス画像 γ_{pre} の明るさに合わせる、ヒストグラムマッチングを行った。ただし一般的な単純なヒストグラムマッチング[81]では洪水域も含めて輝度をマッチングするため、洪水域が過小評価になる問題があった。このため、マッチングの際に洪水の影響を受けた画素を使用しない Masked histogram matching 法を考案した。ここではこの方法の詳細とその利点を述べる。

例として、平成 27 年関東・東北豪雨の 9 月 12 日のデータ（データ 3）の観測事例では、災害前コヒーレンス（図 B-1a）と比べ、時間間隔の開いたデータの干渉処理を用いた災害前コヒーレンス（図 B-1b）は干渉性低下が著しく、両者の画像の輝度が極端に異なることから、このまま差をとる（図 B-1c）と大きな負値となり大幅な誤抽出が生じる。一般的な単純なヒストグラムマッチングは、参照画像と補正対象画像のヒストグラムが一致するよう、補正対象画像の輝度値を変換する。このとき変換前・後の輝度値を対応付けるルックアップテーブル（LUT）は、画像全体のヒストグラムから作成される。この単純ヒストグラムマッチングを行ってから差をとったものが図 B-1(d)であるが、ヒストグラムを強制的に一致させるため洪水によって低下したコヒーレンスも洪水前と同程度まで補正されてしまい、差が出にくい（値がゼロ前後）結果となった。

そこで、本研究では、ルックアップテーブルを作成する際に洪水の影響を受けた画素をマスクし、「正常な」（洪水の影響を受けていない）ピクセルのみを用いて LUT を作成する Masked histogram matching を提案する。これには洪水の影響を受けている画素が事前情報として必要であるが、これには洪水抽出の事前確率としても使用した Today's Earth の洪水面積割合を用い、これが 0.05 以下であるものを除外する。補正対象画像の画素値を変換する際には、洪水の影響を受けた画素も含めて全画素にこの LUT を適用する。この手法で補正してから差をとったものが図 B-1(e)であり、浸水した建物、堤防、道路などが負値（コヒーレンスが低下）となる一方で、

全体としては過補正が解消された。

本手法は、災害の影響範囲に関する事前情報がある場合に、災害の影響を受けていない画素のみのヒストグラムでマッチングを行うことで、災害以外の影響だけを補正し、より効果的に災害を抽出できる差分画像を作成できるものである。

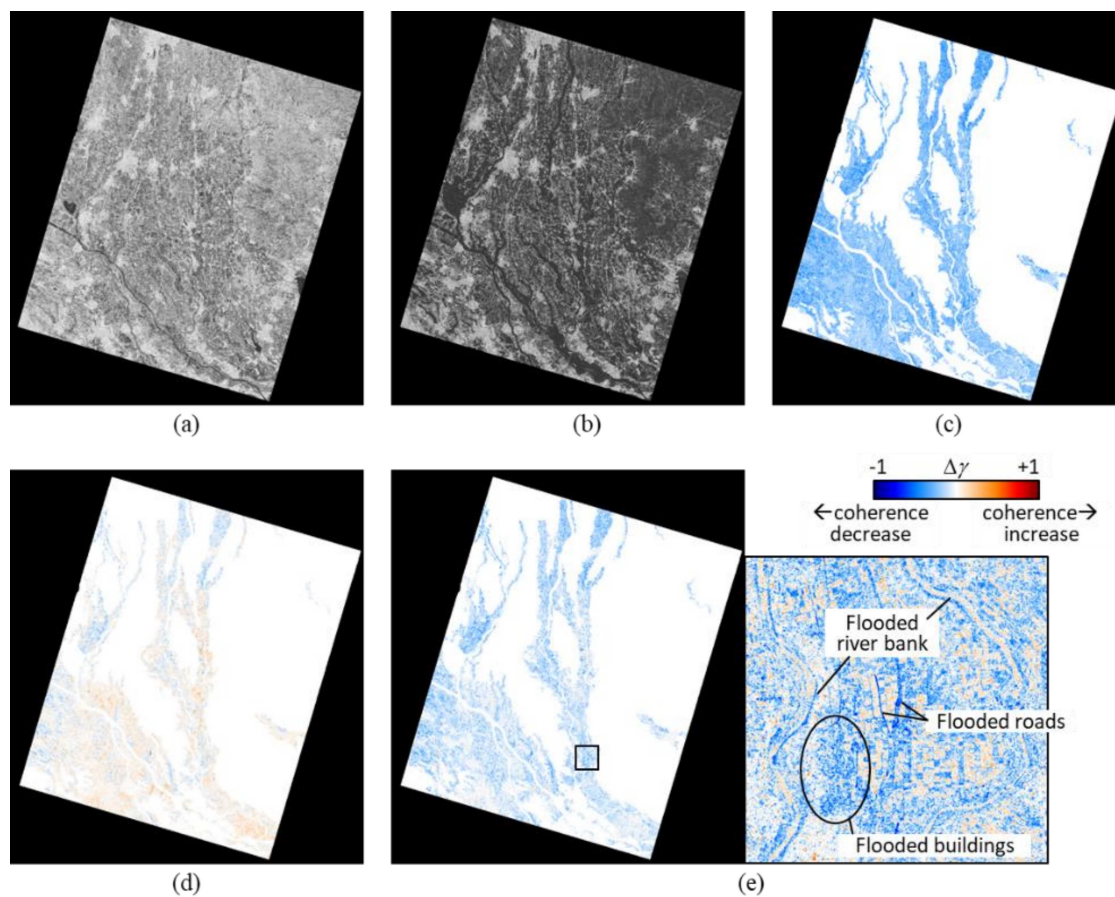


図 B-1 本研究で提案するヒストグラムマッチングの処理過程を、平成 27 年関東・東北豪雨の 9 月 12 日のデータ（データ 3）を例に示す。(a)は災害前コヒーレンス、(b)災害後コヒーレンス、(c)ヒストグラムマッチングを使用しない場合の差分（(b)-(a)）、(d)一般的な単純なヒストグラムマッチングを使用した場合の差分、(e)提案する Masked histogram matching を使用した場合の差分。

本研究に関連する発表リスト

1. 査読付き論文

- (1) 大木 真人, 渡邊 学, 夏秋 嶺, 本岡 毅, 永井 裕人, 田殿 武雄, 鈴木 新一, 石井 景子, 伊藤 拓弥, 山之口 勤, 島田 政信, “ALOS-2 PALSAR-2 データによる平成 27 年 8 月関東・東北豪雨の洪水域把握と精度検証,” *日本リモートセンシング学会誌*, vol. 36, no. 4, pp. 348–359, 2016.
- (2) M. Ohki and M. Shimada, “Large-Area Land Use and Land Cover Classification with Quad, Compact, and Dual Polarization SAR Data by PALSAR-2,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 56, no. 9, pp. 5550–5557, 2018.
- (3) M. Ohki, T. Tadono, T. Itoh, K. Ishii, T. Yamanokuchi, M. Watanabe, and M. Shimada, “Flood Area Detection Using PALSAR-2 Amplitude and Coherence Data: The Case of the 2015 Heavy Rainfall in Japan,” *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observations Remote Sensing*, vol. 12, no. 7, pp. 2288–2298, 2019.
- (4) M. Ohki, T. Abe, T. Tadono, and M. Shimada, “Landslide detection in mountainous forest areas using polarimetry and interferometric coherence,” *Earth, Planets and Space*, vol. 72, no. 1, p. 67, May 2020.
- (5) M. Ohki, T. Tadono, T. Itoh, K. Ishii, T. Yamanokuchi, and M. Shimada, “Flood Detection in Built-Up Areas Using Interferometric Phase Statistics of PALSAR-2 Data,” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 17, no. 11, pp. 1904–1908, 2020.
- (6) M. Ohki, K. Yamamoto, T. Tadono, and K. Yoshimura, “Automated Processing for Flood Area Detection Using ALOS-2 and Hydrodynamic Simulation Data,” *Remote Sensing*, vol. 12, no. 17, 2709, 2020.

※(1)は日本リモートセンシング学会誌に当初和文で発表された論文であり、後に同学会の別冊（英文誌）に下記の英訳版が掲載された。内容は同一である。

- (1') M. Ohki et al., “Flood Area Detection Using ALOS-2 PALSAR-2 Data for the 2015 Heavy Rainfall Disaster in the Kanto and Tohoku Area, Japan,” *Journal of the Remote Sensing Society of Japan*, vol. 39, no. Supplement, pp. S43–S55, 2019.

2. 審査のある国際学会発表

- (1) R. Natsuaki, T. Motohka, M. Watanabe, M. Ohki, R.B. Thapa, H. Nagai, T. Tadono, and M. Shimada, "Emergency observation and disaster monitoring performed by ALOS-2 PALSAR-2," in *Proceedings of 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Beijing, Jul. 2016, pp. 3849–3852.
- (2) M. Ohki and M. Shimada, "PALSAR-2 polarimetric image mosaic and its application to land cover monitoring," in *Proceedings of 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Fort Worth, Jul. 2017, pp. 2458–2459.
- (3) R. Natsuaki, M. Ohki, H. Nagai, T. Motohka, T. Tadono, M. Shimada, and S. Suzuki, "Performance of ALOS-2 PALSAR-2 for disaster response," in *Proceedings of 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Fort Worth, Jul. 2017, pp. 2434–2437.
- (4) M. Ohki and M. Shimada, "Flood-Area Detection Using Palsar-2 Data for Heavy Rainfall Disasters in Japan," in *Proceedings of 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Valencia, Jul. 2018, pp. 8777–8780.
- (5) M. Ohki and M. Shimada, "Flood Detection in built-up Area Using Interferometric SAR Data by PALSAR-2," in *Proceedings of 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Yokohama Jul. 2019, pp.4640–4642.
- (6) M. Ohki, K. Yamamoto, and T. Tadono, "A Study of Automatic Flood-area Detection Using ALOS-2 and Ancillary Data," in *Proceedings of 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, online conference, Sep. 2020.

3. その他の学会・研究会発表、査読無し論文

- (1) 宮城 洋介, 島田 政信, 田殿 武雄, 磯口 治, 大木 真人, "ALOS による 2008 年 5 月 12 日中国四川省地震に関する災害観測," *日本リモートセンシング学会誌*, 28, (4), pp. 357-360, 2008 年 9 月.
- (2) Y. Miyagi, M. Shimada, T. Tadono, O. Isoguchi, and M. Ohki, "ALOS emergency observations by JAXA for monitoring earthquakes and volcanic eruptions in 2008," in *Proceedings of the 2008 2nd Workshop on USE of Remote Sensing Techniques for Monitoring Volcanoes and Seismogenic Areas (USERest)*, 2008.

- (3) 大木真人,島田政信,磯口治,河野宜幸,“ALOS/PALSAR による 2008 年夏季の水害観測結果および検証状況,” *日本リモートセンシング学会学術講演会論文集*, 2008 年 11 月.
- (4) 大木真人,島田政信,“ALOS/PALSAR データの多偏波干渉 SAR 解析による土地被覆分類,” *日本リモートセンシング学会学術講演会論文集*, 2010 年 5 月.
- (5) 加藤誠章,大野宏之,酒井敦章,宮瀬将之,村岡洋,島田政信,田中信也,大木真人,河野宜幸,“ALOS/PALSAR を用いた山形県月山周辺部における土砂移動懸念箇所の抽出と現地状況との対照,” *SABO*, 105, pp. 28–33, 2011 年 1 月.
- (6) 高橋陪夫,島田政信,宮城洋介,大木真人,河野宜幸,白石知弘,本岡毅,“東日本大震災における宇宙航空研究開発機構の取組み,” *写真測量とリモートセンシング*, 50 (4), pp. 198–205, 2011 年 9 月.
- (7) 高橋陪夫,島田政信,宮城洋介,大木真人,河野宜幸,白石知弘,本岡毅,“ALOS「だいち」による東日本大震災の観測結果,” *宇宙科学技術連合講演会講演集(CD-ROM)*, 2011 年.
- (8) M. Takahashi, M. Shimada, Y. Miyagi, M. Ohki, N. Kawano, T. Shiraiishi, and T. Motohka, “Disaster monitoring for Japan Earthquake with satellites by JAXA,” *SENSORS, SYSTEMS, AND NEXT-GENERATION SATELLITES XV, SPIE*, 2011.
- (9) 加藤誠章,大野宏之,酒井敦章,宮瀬将之,村岡洋,島田政信,田中信也,大木真人,河野宜幸,“ALOS/PALSAR を用いた山形県月山周辺部における土砂移動懸念箇所の抽出と現地状況との対照,” *砂防学会研究発表会概要集*, 2011 年 5 月.
- (10) 島田政信,渡邊学,大木真人,本岡毅,“航空機搭載合成開口レーダ(Pi-SAR-L2)による伊豆大島の台風 26 号被害観測結果について,” *写真測量とリモートセンシング*, 53(1), pp. 9–10, 2014 年 3 月.
- (11) M. Shimada, M. Watanabe, T. Motooka, M. Ohki, Y. Wada, “PALSAR-2 and Pi-SAR-L2-Multi frequency Polarimetric Sensitivity on Disaster-,” *10TH EUROPEAN CONFERENCE ON SYNTHETIC APERTURE RADAR (EUSAR 2014)*, 2014.
- (12) M. Ohki, T. Motooka, M. Shimada, “Mosaicking of ALOS/PALSAR polarimetry data and its application to land-cover monitoring in Japan area,” *10TH EUROPEAN CONFERENCE ON SYNTHETIC APERTURE RADAR (EUSAR 2014)*, 2014.
- (13) M. Shimada, M. Watanabe, N. Kawano, M. Ohki, T. Motooka, Y. Wada, “Detecting Mountainous Landslides by SAR Polarimetry: A Comparative Study Using Pi-SAR-L2 and X-band SARs,” *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan*, 12, (29), pp. Pn_9–Pn_15, 2014 年.
- (14) 夏秋嶺,永井裕人,本岡毅,大木真人,渡邊学,田殿武雄,THAPA Rajesh bahadur,島田政信,鈴木新一,“2015 年ネパール地震における ALOS - 2/ALOS による干渉解析と被害抽出,” *日本地球惑星科学連合大会予稿集(Web)*, 2015.

- (15) 高橋 陪夫,石野 達哉,櫻井 洋祐,宮崎 景太,千葉 丈久,高田 裕司,山本 英子,根本 沙織,内藤 一郎,田殿 武雄,大木 真人,夏秋 嶺,永井 裕人,石原 光則,本岡 毅,鈴木 新一, "4. だいち 2号および国際災害チャータ・センチネルアジアによる平成 28 年熊本地震の対応," *写真測量とリモートセンシング*, 55(3), pp. 154–155, 2016.
- (16) 三五大輔,福島芳和,吉川和男,清水祥,森田保成,佐藤弘行,高岸且,渡邊学,米澤千夏,園田潤,大木真人,富井直弥,島田政信,石原光則,夏秋嶺,田殿武雄,本岡毅,永井裕人,鈴木新一,二村忠宏,古田竜一,山之口勤,千葉達朗,灘井章嗣,上本純平,梅原俊彦,児島正一郎,久保田実,浦塚清峰,松岡建志,小林達治,浅田典親,本田謙一,向山栄, "「熊本地震に関するリモートセンシング技術の活用」報告," *日本リモートセンシング学会誌*, 36(3), pp. 202–210, 2016 年 7 月.
- (17) 永井裕人,夏秋嶺,石原光則,大木真人,田殿武雄,本岡毅,鈴木新一, "地球観測衛星による熊本地震の緊急観測対応," *日本地球惑星科学連合大会予稿集(Web)*, 2016.
- (18) R. Natsuaki, M. Watanabe, M. Ohki, and S. Suzuki, "Disaster Affected Area Detection and Display Application for Non-SAR Specialists," *11TH EUROPEAN CONFERENCE ON SYNTHETIC APERTURE RADAR (EUSAR 2016)*, 2016.
- (19) R. Natsuaki, H. Nagai, T. Motohka, M. Ohki, M. Watanabe, and S. Suzuki, "Emergency observation and its analysis using ALOS-2 PALSAR-2 in 2015," *LAND SURFACE AND CRYOSPHERE REMOTE SENSING III, SPIE*, 2016.
- (20) 大木 真人, "「だいち 2号」(ALOS-2)による平成 30 年 7 月豪雨の観測結果について," *日本リモートセンシング学会誌*, 38(5), pp. 419–421, 2018.
- (21) 永井裕人,大木真人,阿部隆博, "「だいち 2号」を用いたハリケーン・イルマの洪水被害把握," *日本地球惑星科学連合大会予稿集(Web)*, 2018.
- (22) 二村忠宏,石井景子,本岡毅,永井裕人,大木真人,田殿武雄, "ALOS - 2 コヒーレンス時系列を用いた災害被災域の抽出の試み," *リモートセンシングシンポジウム講演論文集*, 2018 年 3 月.
- (23) 永井裕人,大木真人,阿部隆博, "正規化後方散乱強度変化指標(NoBADI)の提案と米国ハリケーン被害への応用," *日本リモートセンシング学会学術講演会論文集(CD-ROM)* 2018 年 5 月.
- (24) 大木真人,島田政信, "広域の L バンド PolSAR 解析モザイクデータと,土地被覆分類への応用," *日本リモートセンシング学会学術講演会論文集(CD-ROM)*, 2018 年 5 月.
- (25) T. Tadono, M. Ohki, T. Abe, "Summary of natural disaster responses by the advanced land observing satellite-2 (ALOS-2)," *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, Jan. 2019.

参考文献

- [1] Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) and United Nations Office for Disaster Risk Reduction, “The human cost of weather related disasters: 1995-2015,” 2015. [Online]. Available: <https://www.cred.be/HCWRD>.
- [2] International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, “World Disaster Report.” 2016, [Online]. Available: https://www.ifrc.org/Global/Documents/Secretariat/201610/WDR%202016-FINAL_web.pdf.
- [3] Intergovernmental Panel on Climate Change, “Summary for Policymakers. In: Climate Change 2014.” Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014.
- [4] J. Van Alphen *et al.*, “Flood risk management approaches: As being practiced in Japan, Netherlands, United Kingdom and United States,” *IWR report 2011-R-08, published on behalf of US ACE, Rijkswaterstaat, MLIT and Environment Agency*, 2011.
- [5] 国土交通省, “令和元年東日本台風の発生した令和元年の水害被害額が統計開始以来最大に,” 2020. [Online]. Available: <https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001359046.pdf>.
- [6] Group on Earth Observations (GEO), “GEO Strategic Plan 2016-2025: Implementing GEOSS.” 2016, [Online]. Available: http://www.earthobservations.org/documents/GEO_Strategic_Plan_2016_2025_Implementing_GEOSS.pdf.
- [7] 社会資本整備審議会, “気候変動を踏まえた水災害対策のあり方について,” 答申. [Online]. Available: https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shouinkai/kikouhendou_suigai/pdf/03_honbun.pdf.
- [8] S. Voigt *et al.*, “Global trends in satellite-based emergency mapping,” *Science*, vol. 353, no. 6296, pp. 247–252, Jul. 2016, doi: 10.1126/science.aad8728.
- [9] J.-L. Bessis, J. Béquignon, and A. Mahmood, “The International Charter ‘Space and Major Disasters’ initiative,” *Acta Astronautica*, vol. 54, no. 3, pp. 183–190, Feb. 2004.
- [10] K. Kaku and A. Held, “Sentinel Asia: A space-based disaster management support system in the Asia-Pacific region,” *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 6, pp. 1–17, Dec. 2013, doi: 10.1016/j.ijdr.2013.08.004.
- [11] C. Huang, Y. Chen, S. Zhang, and J. Wu, “Detecting, extracting, and monitoring surface water from space using optical sensors: A review,” *Reviews of Geophysics*, vol. 56, no. 2, pp. 333–360, 2018.
- [12] 祖父江真一 *et al.*, “航空機搭載合成開口レーダ (Pi-SAR-L) によるタイ王国の洪水災害観測,” *日本リモートセンシング学会誌*, vol. 32, no. 1, pp. 22–26, 2012.
- [13] A. Rango and V. V. Salomonson, “Regional flood mapping from space,” *Water Resour. Res.*, vol. 10, no. 3, pp. 473–484, 1974.

- [14] M. L. Imhoff and S. W. McCandless, "Flood boundary delineation through clouds and vegetation using l-band space-borne radar: A potential new tool for disease vector control programs," *Acta Astronautica*, vol. 17, no. 9, pp. 1003–1007, Sep. 1988.
- [15] L. C. Smith, "Satellite remote sensing of river inundation area, stage, and discharge: A review," *Hydrological processes*, vol. 11, no. 10, pp. 1427–1439, 1997.
- [16] K. Ouchi, "Recent Trend and Advance of Synthetic Aperture Radar with Selected Topics," *Remote Sensing*, vol. 5, no. 2, Art. no. 2, Feb. 2013, doi: 10.3390/rs5020716.
- [17] Y. Kankaku, S. Suzuki, and Y. Osawa, "ALOS-2 mission and development status," in *Proceedings of 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Jul. 2013, pp. 2396–2399, doi: 10.1109/IGARSS.2013.6723302.
- [18] 大内和夫, リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎, 第2版. 東京電機大学出版局, 2009.
- [19] 宇宙航空研究開発機構(JAXA)地球観測研究センター, "ALOS-2 プロジェクト/PALSAR-2." <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/about/jpalsar2.htm> (accessed Nov. 01, 2020).
- [20] R. Werninghaus and S. Buckreuss, "The TerraSAR-X Mission and System Design," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 48, no. 2, pp. 606–614, Feb. 2010, doi: 10.1109/TGRS.2009.2031062.
- [21] C. E. Livingstone, I. Sikaneta, C. Gierull, S. Chiu, and P. Beaulne, "RADARSAT-2 system and mode description," 2006.
- [22] Y. Okada *et al.*, "System design of wide swath, high resolution, full polarimetric L-band SAR onboard ALOS-2," in *Proceedings of 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Melbourne, 2013, pp. 2408–2411.
- [23] R. K. Raney, A. P. Luscombe, E. J. Langham, and S. Ahmed, "RADARSAT (SAR imaging)," *Proceedings of the IEEE*, vol. 79, no. 6, pp. 839–849, Jun. 1991, doi: 10.1109/5.90162.
- [24] 本岡毅, 勘角幸弘, and 鈴木新一, "陸域観測技術衛星2号「だいち2号」(ALOS-2)の概要," *日本リモートセンシング学会誌*, vol. 36, no. 4, pp. 320–327, 2016, doi: 10.11440/rssj.36.320.
- [25] J. P. Ormsby, B. J. Blanchard, and A. J. Blanchard, "Detection of lowland flooding using active microwave systems," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 51, no. 3, pp. 317–328, 1985.
- [26] S. Plank, M. Jüssi, S. Martinis, and A. Twele, "Mapping of flooded vegetation by means of polarimetric Sentinel-1 and ALOS-2/PALSAR-2 imagery," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 38, no. 13, pp. 3831–3850, Jul. 2017, doi: 10.1080/01431161.2017.1306143.
- [27] J. Rosenqvist, A. Rosenqvist, K. Jensen, and K. McDonald, "Mapping of Maximum and Minimum Inundation Extents in the Amazon Basin 2014–2017 with ALOS-2 PALSAR-2 ScanSAR Time-Series Data," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 8, Art. no. 8, Jan. 2020, doi: 10.3390/rs12081326.
- [28] A. K. Fung and K. S. Chen, "Dependence of the surface backscattering coefficients on roughness, frequency and polarization states," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 13, no. 9, pp. 1663–1680, Jun. 1992.
- [29] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung, *Microwave remote sensing: Active and passive. Volume 2-*

- Radar remote sensing and surface scattering and emission theory.* Artech house, 1982.
- [30] D. C. Mason, R. Speck, B. Devereux, G. J.-P. Schumann, J. C. Neal, and P. D. Bates, "Flood Detection in Urban Areas Using TerraSAR-X," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 48, no. 2, pp. 882–894, Feb. 2010.
- [31] L. Giustarini, R. Hostache, P. Matgen, G. J.-P. Schumann, P. D. Bates, and D. C. Mason, "A change detection approach to flood mapping in urban areas using TerraSAR-X," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 51, no. 4, pp. 2417–2430, 2013.
- [32] F. Yamazaki and W. Liu, "Extraction of flooded areas due the 2015 Kanto-Tohoku heavy rainfall in Japan using PALSAR-2 images," *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 8, 2016.
- [33] Y. Kwak, S. Yun, and Y. Iwami, "A new approach for rapid urban flood mapping using ALOS-2/PALSAR-2 in 2015 Kinu River Flood, Japan," in *Proceedings of 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2017, pp. 1880–1883.
- [34] A. B. Rimba and F. Miura, "Evaluating the Extraction Approaches of Flood Extended Area by Using ALOS-2/PALSAR-2 Images as a Rapid Response to Flood Disaster," *Journal of Geoscience and Environment Protection*, vol. 05, no. 01, pp. 40–61, 2017.
- [35] T. G. Farr, *Chapter 5. Radar Interactions With Geologic Surfaces*. National Aeronautics and Space Administration, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 1993.
- [36] L. Pulvirenti, M. Chini, N. Pierdicca, L. Guerriero, and P. Ferrazzoli, "Flood monitoring using multi-temporal COSMO-SkyMed data: Image segmentation and signature interpretation," *Remote Sensing of Environment*, vol. 115, no. 4, pp. 990–1002, 2011.
- [37] W. Liu and F. Yamazaki, "Review article: Detection of inundation areas due to the 2015 Kanto and Tohoku torrential rain in Japan based on multi-temporal ALOS-2 imagery," *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 18, no. 7, pp. 1905–1918, Jul. 2018.
- [38] M. Arii, "Sensitivity study of ALOS-2 data to floodwaters in Joso City in 2015 and its application," *Journal of the Remote Sensing Society of Japan*, vol. 38, no. 4, pp. 325–336, 2018.
- [39] A. Refice *et al.*, "SAR and InSAR for Flood Monitoring: Examples With COSMO-SkyMed Data," *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observations Remote Sensing*, vol. 7, no. 7, pp. 2711–2722, Jul. 2014.
- [40] L. Pulvirenti, M. Chini, N. Pierdicca, and G. Boni, "Use of SAR data for detecting floodwater in urban and agricultural areas: The role of the interferometric coherence," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 54, no. 3, pp. 1532–1544, 2015.
- [41] M. Chini, R. Pelich, L. Pulvirenti, N. Pierdicca, R. Hostache, and P. Matgen, "Sentinel-1 InSAR coherence to detect floodwater in urban areas: Houston and Hurricane Harvey as a test case," *Remote Sensing*, vol. 11, no. 2, p. 107, 2019.
- [42] W. Liu, F. Yamazaki, Y. Maruyama, and Graduate School of Engineering, Chiba University 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522, Japan, "Extraction of Inundation Areas Due to the July 2018 Western Japan Torrential Rain Event Using Multi-Temporal ALOS-2 Images," *Journal of Disaster Research*, vol. 14, no. 3, pp. 445–455, Mar. 2019.
- [43] R. Natsuaki and H. Nagai, "Synthetic Aperture Radar Flood Detection under Multiple Modes and

- Multiple Orbit Conditions: A Case Study in Japan on Typhoon Hagibis, 2019,” *Remote Sensing*, vol. 12, no. 6, p. 903, 2020.
- [44] C. W. J. Tay, S.-H. Yun, S. T. Chin, A. Bhardwaj, J. Jung, and E. M. Hill, “Rapid flood and damage mapping using synthetic aperture radar in response to Typhoon Hagibis, Japan,” *Scientific Data*, vol. 7, no. 1, Art. no. 1, Mar. 2020, doi: 10.1038/s41597-020-0443-5.
- [45] N. Otsu, “A threshold selection method from gray-level histograms,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 9, no. 1, pp. 62–66, 1979.
- [46] J. Kittler and J. Illingworth, “Minimum error thresholding,” *Pattern recognition*, vol. 19, no. 1, pp. 41–47, 1986.
- [47] S. Martinis, A. Twele, and S. Voigt, “Towards operational near real-time flood detection using a split-based automatic thresholding procedure on high resolution TerraSAR-X data.,” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 9, no. 2, 2009.
- [48] S. Martinis, J. Kersten, and A. Twele, “A fully automated TerraSAR-X based flood service,” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 104, pp. 203–212, 2015.
- [49] A. Twele, W. Cao, S. Plank, and S. Martinis, “Sentinel-1-based flood mapping: a fully automated processing chain,” *International Journal of Remote Sensing*, vol. 37, no. 13, pp. 2990–3004, 2016.
- [50] M. Chini, R. Hostache, L. Giustarini, and P. Matgen, “A hierarchical split-based approach for parametric thresholding of SAR images: Flood inundation as a test case,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 55, no. 12, pp. 6975–6988, 2017.
- [51] W. Kang, Y. Xiang, F. Wang, L. Wan, and H. You, “Flood Detection in Gaofen-3 SAR Images via Fully Convolutional Networks,” *Sensors*, vol. 18, no. 9, p. 2915, Sep. 2018.
- [52] Y. Li, S. Martinis, and M. Wieland, “Urban flood mapping with an active self-learning convolutional neural network based on TerraSAR-X intensity and interferometric coherence,” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 152, pp. 178–191, 2019.
- [53] E. Nemni, J. Bullock, S. Belabbes, and L. Bromley, “Fully Convolutional Neural Network for Rapid Flood Segmentation in Synthetic Aperture Radar Imagery,” *Remote Sensing*, vol. 12, no. 16, Art. no. 16, Jan. 2020, doi: 10.3390/rs12162532.
- [54] L. Giustarini *et al.*, “Probabilistic flood mapping using synthetic aperture radar data,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 54, no. 12, pp. 6958–6969, 2016.
- [55] Y. Li, S. Martinis, M. Wieland, S. Schlaffer, and R. Natsuaki, “Urban Flood Mapping Using SAR Intensity and Interferometric Coherence via Bayesian Network Fusion,” *Remote Sensing*, vol. 11, no. 19, p. 2231, 2019.
- [56] L. Pulvirenti, N. Pierdicca, M. Chini, and L. Guerriero, “An algorithm for operational flood mapping from synthetic aperture radar (SAR) data based on the fuzzy logic,” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2011.
- [57] A. D’Addabbo, A. Refice, G. Pasquariello, F. P. Lovergine, D. Capolongo, and S. Manfreda, “A Bayesian network for flood detection combining SAR imagery and ancillary data,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 54, no. 6, pp. 3612–3625, 2016.
- [58] 国土交通省, “台風第18号及び第17号による大雨(平成27年9月関東・東北豪雨)等に

- 係る被害状況等について,” 2016. [Online]. Available:
http://www.bousai.go.jp/updates/h27typhoon18/pdf/h27typhoon18_28.pdf.
- [59] 国土交通省, “平成 30 年 7 月豪雨による被害状況等について,” 2019. [Online]. Available:
<https://www.mlit.go.jp/common/001268344.pdf>.
- [60] 国土交通省, “令和元年 8 月の前線に伴う大雨による被害状況等について,” 2019. [Online]. Available:
<https://www.mlit.go.jp/common/001319304.pdf>.
- [61] 国土交通省, “令和元年台風第 19 号等による被害状況等について,” 2020. [Online]. Available:
<https://www.mlit.go.jp/common/001340439.pdf>.
- [62] 国土交通省, “令和 2 年 7 月豪雨災害による被害状況等について,” 2020. [Online]. Available:
<https://www.mlit.go.jp/common/001370824.pdf>.
- [63] Y. Okada, Y. Yokota, A. Karasawa, M. Matsuki, M. Arii, and S. Nakamura, “Hardware performance of PALSAR-3 Onboard ALOS-4,” in *Proceedings of 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Valencia, 2018, pp. 4175–4176.
- [64] 国土地理院, “平成 27 年 9 月関東・東北豪雨の情報.”
<https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27.taihuu18gou.html> (accessed Nov. 01, 2020).
- [65] 国土地理院, “平成 28 年台風第 11 号及び第 9 号に関する情報について.”
https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H28.taihuu11_9gou.html (accessed Nov. 01, 2020).
- [66] 国土地理院, “平成 30 年 7 月豪雨に関する情報.”
<https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H30.taihuu7gou.html> (accessed Nov. 01, 2020).
- [67] 国土地理院, “令和元年(2019 年)8 月の前線に伴う大雨に関する情報.”
https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/R1_kyusyu_heavyrain.html (accessed Nov. 01, 2020).
- [68] 国土地理院, “令和元年東日本台風に関する情報.”
<https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/R1.taihuu19gou.html> (accessed Nov. 01, 2020).
- [69] 国土地理院, “令和元年(2019 年)10 月の低気圧に伴う大雨に関する情報.”
https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/R1_10gatsuheavyrain.html (accessed Nov. 01, 2020).
- [70] 国土地理院, “令和 2 年 7 月豪雨に関する情報.”
https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/R2_kyusyu_heavyrain_jul.html (accessed Nov. 01, 2020).
- [71] 国土地理院応用地理部災害対策班, “平成 27 年 9 月関東・東北豪雨災害に関する常総地区推定浸水範囲図の作成,” 128, 2016.
- [72] 吉田一希, “平成 30 年 7 月豪雨に伴う高梁川流域と肱川流域の浸水範囲と浸水深分布の推定,” *日本リモートセンシング学会誌*, vol. 38, no. 5, pp. 422–425, 2018.
- [73] R. G. Congalton, “A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 37, no. 1, pp. 35–46, 1991.
- [74] 防災科学技術研究所, “平成 27 年 関東・東北豪雨調査報告,” 51, 2018.
- [75] 宇宙航空研究開発機構(JAXA)地球観測研究センター, “High-Resolution Land Use and Land Cover Map Products.” https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/lulc/lulc_index.htm (accessed Nov. 01, 2020).
- [76] T. Motohka, O. Isoguchi, M. Sakashita, and M. Shimada, “Results of ALOS-2 PALSAR-2 Calibration and Validation After 3 Years of Operation,” in *Proceedings of 2018 IEEE International*

- Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Jul. 2018, pp. 4169–4170, doi: 10.1109/IGARSS.2018.8519118.
- [77] 宇宙航空研究開発機構(JAXA)地球観測研究センター, “ALOS-2/PALSAR-2 JAXA 標準プロダクトの精度評価結果.” https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/calval/calval_jindex.htm (accessed Nov. 01, 2020).
- [78] M. Shimada, “Model-based polarimetric SAR calibration method using forest and surface-scattering targets,” *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 49, no. 5, pp. 1712–1733, 2011.
- [79] J.-S. Lee, “Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, no. 2, pp. 165–168, 1980.
- [80] Z. Shi and K. B. Fung, “A comparison of digital speckle filters,” in *Proceedings of 1994 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Pasadena, 1994, vol. 4, pp. 2129–2133, Accessed: May 28, 2020. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/399671/>.
- [81] 高木幹夫 and 下田晴久, 機能篇第I部. 東京: 東京大学出版会, 1991.
- [82] D. Massonnet and K. L. Feigl, “Radar interferometry and its application to changes in the Earth’s surface,” *Reviews of Geophysics*, vol. 36, no. 4, pp. 441–500, 1998.
- [83] H. A. Zebker and J. Villasenor, “Decorrelation in interferometric radar echoes,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 30, no. 5, pp. 950–959, Sep. 1992.
- [84] 新井宏嘉, “地質学における方向データ解析法: 円周データの統計学,” *地質学雑誌*, vol. 117, no. 10, pp. 547–564, 2011.
- [85] A. L. Gray and P. J. Farris-Manning, “Repeat-pass interferometry with airborne synthetic aperture radar,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 31, no. 1, pp. 180–191, 1993.
- [86] E. Rodriguez and J. M. Martin, “Theory and design of interferometric synthetic aperture radars,” in *IEE Proceedings F (Radar and Signal Processing)*, 1992, vol. 139, pp. 147–159.
- [87] J.-S. Lee, K. W. Hoppel, S. A. Mango, and A. R. Miller, “Intensity and phase statistics of multilook polarimetric and interferometric SAR imagery,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 32, no. 5, pp. 1017–1028, 1994.
- [88] D. Just and R. Bamler, “Phase statistics of interferograms with applications to synthetic aperture radar,” *Applied optics*, vol. 33, no. 20, pp. 4361–4368, 1994.
- [89] J. A. Tough, D. Blacknell, and S. Quegan, “A statistical description of polarimetric and interferometric synthetic aperture radar data,” *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences*, vol. 449, no. 1937, pp. 567–589, 1995.
- [90] F. K. Li and R. M. Goldstein, “Studies of multibaseline spaceborne interferometric synthetic aperture radars,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 28, no. 1, pp. 88–97, 1990.
- [91] G. E. P. Box and M. E. Muller, “A Note on the Generation of Random Normal Deviates,” *Ann. Math. Statist.*, vol. 29, no. 2, pp. 610–611, Jun. 1958, doi: 10.1214/aoms/1177706645.
- [92] R. M. Goldstein and C. L. Werner, “Radar interferogram filtering for geophysical applications,” *Geophysical research letters*, vol. 25, no. 21, pp. 4035–4038, 1998.
- [93] A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, “Permanent scatterers in SAR interferometry,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 39, no. 1, pp. 8–20, 2001.

- [94] I. R. Joughin, D. P. Winebrenner, and D. B. Percival, “Probability density functions for multilook polarimetric signatures,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 32, no. 3, pp. 562–574, 1994.
- [95] R. Touzi and A. Lopes, “Statistics of the Stokes parameters and of the complex coherence parameters in one-look and multilook speckle fields,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 34, no. 2, pp. 519–531, 1996.
- [96] R. Touzi and F. Charbonneau, “Characterization of target symmetric scattering using polarimetric SARs,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 40, no. 11, pp. 2507–2516, 2002.
- [97] 内閣府, “平成 30 年 7 月豪雨による被害状況等について.” [Online]. Available: http://www.bousai.go.jp/updates/h30typhoon7/pdf/300905_1700_h30typhoon7.pdf.
- [98] 宇宙航空研究開発機構(JAXA)地球観測研究センター, “Today’s Earth.” <https://www.eorc.jaxa.jp/water/> (accessed Nov. 01, 2020).
- [99] K. Yoshimura, T. Sakimura, T. Oki, S. Kanae, and S. Seto, “Toward flood risk prediction: a statistical approach using a 29-year river discharge simulation over Japan,” *Hydrological Research Letters*, vol. 2, pp. 22–26, 2008.
- [100] K. Yoshimura *et al.*, “Development of flood forecasting system over Japan and application to 2018 Japan floods event,” *Geophysical Research Abstracts*, vol. 21, pp. EGU2019-16058, 2019.
- [101] K. Takata, S. Emori, and T. Watanabe, “Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff,” *Global and Planetary Change*, vol. 38, no. 1–2, pp. 209–222, Jul. 2003.
- [102] T. Nitta *et al.*, “Representing variability in subgrid snow cover and snow depth in a global land model: Offline validation,” *Journal of climate*, vol. 27, no. 9, pp. 3318–3330, 2014.
- [103] D. Yamazaki, S. Kanae, H. Kim, and T. Oki, “A physically based description of floodplain inundation dynamics in a global river routing model: FLOODPLAIN INUNDATION DYNAMICS,” *Water Resour. Res.*, vol. 47, no. 4, Apr. 2011, Accessed: May 28, 2020. [Online]. Available: <http://doi.wiley.com/10.1029/2010WR009726>.
- [104] D. Yamazaki, G. A. M. de Almeida, and P. D. Bates, “Improving computational efficiency in global river models by implementing the local inertial flow equation and a vector-based river network map: Speeding Up Global River Model Simulations,” *Water Resour. Res.*, vol. 49, no. 11, pp. 7221–7235, Nov. 2013.
- [105] P. D. Bates, M. S. Horritt, and T. J. Fewtrell, “A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling,” *Journal of Hydrology*, vol. 387, no. 1–2, pp. 33–45, Jun. 2010.
- [106] 山田康晴, タワチャイ ティングサンチャリ, ビラット カオウツパタム, 石坂邦美, and 中村義文, “数理形態学的方法による L バンド合成開口レーダデータを使用した洪水浸水域推定手法,” *農工研技報*, vol. 206, pp. 65–82, 2007.
- [107] D. H. Douglas and T. K. Peucker, “Algorithms for the Reduction of the Number of Points Required to Represent a Digitized Line or its Caricature,” in *Classics in Cartography*, M. Dodge, Ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2011, pp. 15–28.
- [108] 中央防災会議防災対策実行会議, “洪水・高潮氾濫からの大規模・広域避難に関する基

- 本的な考え方（報告）,” 2018. [Online]. Available:
<http://www.bousai.go.jp/fusuigai/kozuiworking/pdf/suigai/honbun.pdf>.
- [109] 国土地理院地理地殻活動研究センター地理情報解析研究室, “浸水状況把握のリアルタイム化に関する研究.” [Online]. Available: <https://www.gsi.go.jp/common/000143202.pdf>.
- [110] 田中吾朗 and 新田堯之, “自然災害による経済被害額の推計手法について—平成 30 年 7 月豪雨を例に—.” [Online]. Available: <https://www5.cao.go.jp/keizai3/discussion-paper/dp184.pdf>.
- [111] 佐山敬洋 and 寶馨, “平成 27 年 9 月関東・東北豪雨に伴う鬼怒川氾濫の浸水深分布推定,” *土木学会論文集 B1 (水工学)*, vol. 72, no. 4, p. I_1171–I_1176, 2016.
- [112] 佐山敬洋, 大槻順朗, 永野博之, and 二瓶泰雄, “平成 27 年関東・東北水害 鬼怒川氾濫による常総市周辺の浸水深分布調査（第二報）,” 2015. <https://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/news/6105/> (accessed Nov. 01, 2020).
- [113] 金城海輝, 白水元, and 朝位孝二, “SAR 衛星画像を用いた岡山県真備町の浸水状況解析,” *自然災害研究協議会中国地区部会研究論文集*, no. 5, pp. 31–34, 2019.
- [114] 山口芳雄, *レーダポーラリメトリの基礎と応用：偏波を用いたレーダリモートセンシング*. 電子情報通信学会, 2007.
- [115] 国土地理院, “平成 29 年 7 月九州北部豪雨に関する情報.” https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H29hukuoka_ooita-heavyrain.html (accessed Nov. 01, 2020).
- [116] 国土地理院, “平成 30 年(2018 年)北海道胆振東部地震に関する情報.” <https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H30-hokkaidoiburi-east-earthquake-index.html> (accessed Nov. 01, 2020).
- [117] T. Shibayama, Y. Yamaguchi, and H. Yamada, “Polarimetric Scattering Properties of Landslides in Forested Areas and the Dependence on the Local Incidence Angle,” *Remote Sensing*, vol. 7, no. 11, Art. no. 11, Nov. 2015, doi: 10.3390/rs71115424.
- [118] 西田顕郎, 小橋澄治, and 水山高久, “数値地形モデルに基づく地震時山腹崩壊斜面の地形解析,” *砂防学会誌*, vol. 49, no. 6, pp. 9–16, 1997.
- [119] L. Breiman, “Random forests,” *Machine learning*, vol. 45, no. 1, pp. 5–32, 2001.

謝辞

本研究を遂行するにあたり学術的な立場からご指導をいただいた多くの先生方にまず謝意を表します。東京大学社会基盤工学専攻（生産技術研究所）の芳村圭教授には、第一に、指導教官に相当する立場から、洪水シミュレーションや河川防災の見地から本研究へ多くの助言をいただき、第二に、筆者が社会人として論文博士を取得するにあたり、メンターとして学位取得に向けた取り組み方や論文のまとめ方についてもご指導いただきました。同専攻の沖一雄教授には本研究への助言のほか、学位取得についての相談に最初に乗っていただき、結果的に同専攻で学位を取得するきっかけを与えていただきました。同専攻の竹内渉教授には学会等でお世話になると同時に特に災害・環境リモートセンシングの学術的な立場から本研究の方向性やまとめ方に対し貴重なご意見をいただきました。同専攻の山崎大准教授には洪水リスクや数値モデルの研究の立場から本研究に関心を示していただき、災害リスク研究のコミュニティに筆者が参画するきっかけを与えていただきました。東京電機大学の島田政信教授（元 JAXA 上席研究員）には、JAXA においてはリモートセンシングの知識が皆無であった筆者に合成開口レーダの基礎について指導いただき、大学へのご転籍後も本研究への助言をいただきました。

お世話になった職場の皆様にも感謝いたします。上司である田殿武雄氏には筆者の研究および学位の取得に対してご理解と応援をいただき、ご自身が業務で多忙な中でも筆者に研究および論文の執筆ができる環境と時間を与えて頂きました。防災科学技術研究所の宮城陽介氏、東京大学の夏秋嶺氏、国立環境研究所の白石知弘氏、農業・食品産業技術総合研究機構の石原光則氏、早稲田大学の永井裕人氏、東京電機大学の渡邊学氏、三重大大学の阿部隆博氏、JAXA の河野宜幸氏、高橋陪夫氏、本岡毅、林真智氏とは本研究に関連する災害関連の観測データの研究や、災害発生時の緊急対応を共に行いました。JAXA の山本晃輔氏には Today's Earth の洪水シミュレーションについてデータの意味や読み込み方などの基礎をお教えいただきました。一般財団法人リモート・センシング技術センターの山之口勉氏、伊藤拓弥氏、石井景子氏には本研究に関連する災害解析業務の作業を分担していただきました。また同センターの故・和田裕氏も本研究に貢献されましたが、2015 年 8 月に他界されました。謹んで感謝と哀悼の意を表します。

本研究で用いた基幹的なツールである ALOS-2 衛星は JAXA や企業等の多くの関係者によって支えられています。同衛星の初期のプロジェクトマネージャ（PM）である大澤右二氏には筆者の災害解析の検討結果を ALOS-2 開発前から資料で活用いただき、ミッション

創出の段階から ALOS-2 に貢献できたことは筆者にとっても光栄でした。ALOS-2 の 2 代目の PM で後継機 ALOS-4 の PM を引き続き務められている鈴木新一氏には本研究に継続的に関心を示していただき、衛星開発・運用の立場から助言も頂きました。また、ALOS-2 のユーザ（連携協定機関）である国土交通省およびその関連機関の各位にはユーザのニーズや本研究のプロダクトへのフィードバックを頂いたほか、そのユーザ機関との情報交換の場である水害 WG は JAXA 衛星利用運用センターによって運営されました。

最後に、研究や学位取得を経済的、精神的に支援していただいた家族に一番の感謝の意を申し上げます。