

## 論文の内容の要旨

論文題目 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

氏 名 大木 真人

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のモードでは数十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データの特徴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

り、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(3章)と建物浸水(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。また、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。