(31) オープン形式の SAR 画像を用いた浸水域の抽出に関する一考察

浅野　達海[1]・今井　龍一[2]・中村　健二[3]・塚田　義典[4]・
清水　則一[5]・平野　順俊[6]・仲条　仁[7]・山本　忍[8]

[1]学生会員　法政大学大学院　デザイン工学研究科（〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33）
E-mail: tatsumi.asano.2g@stu.hosei.ac.jp

[2]正会員　法政大学教授　デザイン工学部（〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33）
E-mail: imai@hosei.ac.jp

[3]正会員　大阪経済大学教授　情報社会学部（〒533-8533 大阪府大阪市東淀川区大隅 2-2-8）
E-mail: k-nakamu@osaka-ue.ac.jp

[4]正会員　摂南大学准教授　経営学部（〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町 17-8）
E-mail: yoshinori.tsukada@kjo.setsunan.ac.jp

[5]正会員　関西大学特任教授　先端科学技術推進機構（〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35）
E-mail: nshimizu@kanasai-u.ac.jp

[6]正会員　株式会社日本インシーク技術本部（〒541-0054 大阪市中央区南本町 3-6-14）
E-mail: hirano059@insiek.co.jp

[7]正会員　株式会社 Create-C（〒101-0041 東京都千代田区神田須田町 2-25）
E-mail: j-chujo@create-c.co.jp

[8]学生会員　法政大学大学院　デザイン工学研究科（〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33）
E-mail: jin.yamamoto.2j@stu.hosei.ac.jp

我が国では，自然災害により河川の氾濫や土砂災害が発生している．迅速な被害の把握のため，広域の国土を観測する SAR 画像が利用されているが，その画像は一般に有償である．一方，SAR 衛星 Sentinel-1 の画像は無償のため，国土の定常的な監視に適用できれば，インフラ管理の高度化が期待できる．そこで，本研究では，ともにオープン形式の SAR 画像と解析用ソフトウェアを用いた浸水域の抽出と浸水深さの推定を試行した．その結果，国土地理院の浸水推定図で示される一部浸水域の約 6 割を再現できた．また，浸水深さの推定結果が実測値と概ね一致した．したがって，オープン形式の SAR 画像が浸水被害の概略把握に有用なことが示唆された．

Key Words: *SAR, open data, Sentinel-1, inundation area, backscatter intensity, binarization*

1. はじめに

我が国では，豪雨による浸水，地震，津波等の大規模な自然災害により，突発的かつ広域な河川の氾濫や土砂災害が発生している．広域の災害復旧では，迅速な被災状況の把握と適切な初動対応が求められる．こうした背景を受け，効率的に国土を観測するリモートセンシング技術である合成開口レーダ（以下，「SAR」とする．）が注目されている．SAR の観測成果である画像（以下，「SAR 画像」とする．）は，災害時の状況把握や特定期間の地形変動の分析に適している [1)]．例えば，河川の氾濫発生前後の SAR 画像における後方散乱強度の差から，広域の浸水域を把握できる [2-4)]．後方散乱強度とは，SAR 衛星が照射したマイクロ波のうち地表面で散乱し照射方向側へ戻るマイクロ波の強度である．白水ら [3)]は，SAR 衛星 ALOS-2 の SAR 画像を用いた後方散乱強度解析により浸水域を抽出している．さらに，抽出した浸水域と DEM データを組み合わせることで，浸水深さを算出する手法を考案し，その有用性を示している．しかし，SAR 画像は一般に有償であるため，費用対効果の面から，定常

的なインフラモニタリングへの導入には，なお課題がある．そこで，著者らは，欧州宇宙機関（以下，「ESA」とする．）の SAR 衛星 Sentinel-1 に注目した．Sentinel-1 は，C バンド帯のマイクロ波を送受信し，同一地域を 12 日に一度，空間分解能 5m×20m で観測する．この衛星の SAR 画像は，オープン形式で定期的に配信されているため，利用に際して費用がかからない．また，ESA は，解析用ソフトウェアも無償で提供している．このような，ともにオープン形式の SAR 画像と解析用ソフトウェアを国土の定常的な監視に適用できると，例えば，ゲリラ豪雨により定期的に生じる浸水箇所の検出，インフラ管理の多用途展開や高度化等が期待できる．既存研究では，オープン形式の SAR 画像を用いて浸水域の推定した事例 [4]があるが，推定結果の定量的な評価を含め，今後さらに研究が必要である．

以上より，本研究の目的は，ともにオープン形式の SAR 画像と解析用ソフトウェアを用いた国土の災害状況把握の適用可能性の検証とする．本稿では，検証の一事例としてオープン形式の SAR 画像を用いて浸水域を抽出し，浸水深さを推定する．また，これらの解析に必要な処理を半自動で実行する．そして，オープン形式のデータを用いた定常的な国土の監視や迅速な被災状況の把握に必要な解析処理のフレームワークを提案する．

2. 提案手法の概要

オープン形式の SAR 画像を用いた浸水域の抽出処理と浸水深さの推定処理を**図-1** に示す．浸水域の抽出処理では，二時期後方散乱強度解析が無償で実行できる衛星画像解析用ソフトウェアの SNAP [5]を利用する．その後の各処理は Python プログラムで実行し，浸水域のポリゴンデータ（以下，「浸水域ポリゴン」とする．）を作成する．浸水深さの推定処理では，QGIS [6]を用いて浸水域ポリゴンと DEM データから浸水深さの値を持ったメッシュデータ（以下，「浸水深さメッシュ」とする．）を作成する．なお，浸水域ポリゴンは，解析範囲が広大なため，解析対象の浸水域を手動で選択する．

(1) 浸水域の抽出処理

a) 二時期カラー合成画像の作成

本処理では，浸水発生前後の SAR 画像を用いて後方散乱強度解析を実行する．SAR 画像は，地表に放射したマイクロ波の反射強度を後方散乱係数として記録する．SAR 画像上で浸水が発生した箇所は，マイクロ波の反射面がなめらかになり後方散乱係数が減少する．これを利用し，浸水前の SAR 画像を赤色，浸水後の SAR 画像を青色で着色し両者を重ね合わせる．その結果，浸水の発生した箇所を赤色で表現した二時期カラー合成画像が作成される．

b) 二時期カラー合成画像の二値化

二時期カラー合成画像の二値化処理では，後方散乱係数の差を用いて各ピクセルを浸水有と浸水無に分類する．また，二時期の後方散乱係数の変化を表す指標として変化指標を用いた．変化指標は，白水ら [2]の研究を参考に定義した．以下に各ピクセルにおける変化指標の算出式を示す．

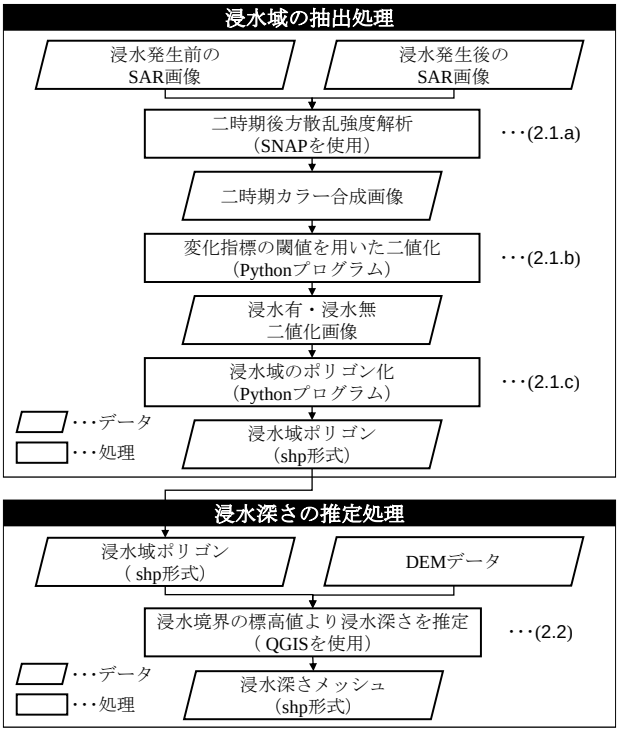


図-1 浸水域の抽出および浸水深さの推定フロー

$$\text{変化指標}=\frac{\text{後方散乱係数の差（浸水前 − 浸水後）}}{\text{後方散乱係数の和（浸水前＋浸水後）}}$$

ただし，後方散乱係数は dB で表す．この値が別に設定した閾値よりも小さいピクセルは浸水有，大きいピクセルは浸水無とする．

c) 浸水域ポリゴンの作成

浸水域ポリゴンの作成処理では，浸水有のピクセルからなる領域を単純化するため，二値化画像に Majority Filter を適用する．そして，浸水有の領域およびこれに内包された領域を浸水域ポリゴンとして抽出する．

(2) 浸水深さの推定処理

浸水深さは，浸水域ポリゴンをメッシュ化し DEM データが持つ標高の情報を付与することで推定する．具体的には，浸水域の境界部のメッシュが保持する標高の平均値または最大値を算出し，各メッシュの標高との差を浸水深さとする．なお，DEM データは，国土地理院の基盤地図情報ダウンロードサービス [7]より取得した 5m メッシュの数値標高モデルである．

(3) 結果の評価指標

浸水域ポリゴンは，国土地理院が公開する浸水推定図の輪郭線データ [8]（以下，「浸水推定図」とす

る．）と比較することで評価する．まず，浸水推定図内の浸水域の一部を解析対象として設定する．次に，設定した浸水域を正解とし，正解の面積を算出する．最後に，正解の範囲に含まれる浸水域ポリゴンの面積と正解の面積に対する割合を算出する．

浸水深さメッシュは，浸水痕跡調査結果 [9]をもとに作成したポイントデータと比較することで評価する．浸水痕跡調査結果は，茨城大学令和元年度台風19 号災害調査団による浸水発生後の現地調査の結果をもとに作成されたものである．ポイントデータは，浸水痕跡調査結果をもとに QGIS 上で各調査箇所をプロットすることで作成する．そして，各調査箇所における浸水深さの実測値と浸水深さメッシュの値とを比較する．

3. 提案手法の適用結果

本章では，令和元年東日本台風による，那珂川流域の茨城県水戸市渡里・飯富地区における浸水被害に提案手法を適用する．本研究で用いた SAR 画像の詳細を**表-1** に示す．那珂川の氾濫は，2019 年 10 月 12 日の夜から 13 日の未明にかけて発生したため，本研究では 2019 年 10 月 7 日と 10 月 13 日の Sentinel-1 による SAR 画像を使用した．また，浸水推定図は 2019 年 10 月 14 日午前 1 時時点，浸水痕跡調査結果は 10 月 16 日，10 月 17 日，11 月 7 日時点の情報をもとに作成されたものを使用した．

(1) 浸水域ポリゴンと浸水推定図との比較検証

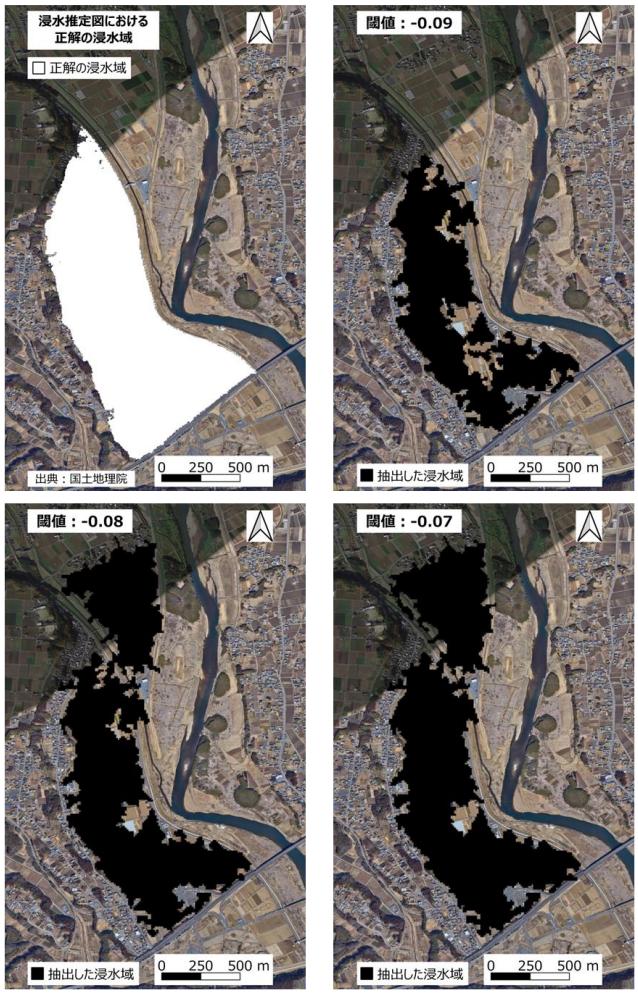
二時期カラー合成画像において後方散乱係数の値は 1,000 分の 1 程度の小数であり，その値を対数表示に変換しているため，各ピクセルの値は負の値になる．そのため，変化指標の閾値が小さすぎる場合，浸水有に該当するピクセル数が減少し，浸水域を過少に抽出する可能性がある．一方，閾値が大きすぎる場合，浸水有に該当するピクセル数が増加し，浸水域を過大に抽出する可能性がある．

したがって，本検証では，浸水域を独立したポリゴンとして抽出することができる適切な閾値を明らかにするため，閾値を-0.09，-0.08，-0.07 の 3 パターンに設定し浸水域を抽出した．浸水域ポリゴンと浸水推定図の可視化結果を**図-2** に示す．**図-2** より，閾値を-0.09 に設定した際の浸水域ポリゴンの範囲は，過小評価ではあるが正解の範囲と概ね一致した．また，閾値を-0.08，-0.07 に設定した場合は，より広域な浸水域を推定したことがわかる．正解の面積と，正解の範囲内における浸水域ポリゴンの面積を**表-2** に示す．閾値が-0.09 の場合は，正解の約 6 割の面積を抽出した．また，閾値が-0.07 の場合では，正解の約 7 割の面積を抽出した．しかし，浸水域を過大に抽出しているため，閾値が-0.09 での抽出結果に対し，単純に精度が高いとはいえない．

以上より，本検証における解析対象の浸水域の抽出において，閾値-0.09 が適当であることがわかった．しかし，閾値が-0.08，-0.07 のパターンの方が浸水域の抽出精度が高いことから適切な閾値とはいえない．したがって，解析対象とする浸水域の範囲や閾値のパラメトリック検証によって，適切な閾値を調査する必要がある．

表-1 本研究で用いた Sentinel-1 の SAR 画像の詳細

データの諸元	災害前	災害後
観測時期	2019/10/7	2019/10/13
軌道の方向	北行	北行
観測の向き	右向き観測	右向き観測
観測モード	IW	IW
偏波	VV	VV



背景地図:Google Earth

図-2 浸水域ポリゴンと浸水推定図の可視化結果

表-2 正解の面積と浸水域ポリゴンの面積の比較結果

比較項目	各浸水域の面積	正解の面積に対する割合
正解	2.23km^2	100.0%
浸水域ポリゴン 閾値：-0.09	1.38km^2	60.5%
浸水域ポリゴン 閾値：-0.08	1.49km^2	67.0%
浸水域ポリゴン 閾値：-0.07	1.57km^2	70.5%

(2) 浸水深さメッシュと浸水痕跡調査結果との比較検証

浸水深さメッシュと，浸水痕跡調査箇所の重畳結果を**図-3** に示す．なお，浸水深さメッシュの作成には，変化指標の閾値が-0.09 の場合の浸水域を使用した．浸水痕跡調査結果は，解析対象とする浸水域内に位置する箇所のみ，地点 1 から 3 として示している．地点 1 から 3 の浸水痕跡調査結果と，境界部における標高の平均値，もしくは最大値を参照した場合の浸水深さメッシュを**表-3** に示す．各地点の浸水深さメッシュを見ると，境界部の標高の平均値を参照した場合は，浸水痕跡調査結果に対して浸水深さが小さく推定された．一方，境界部の標高の最大値を参照した場合は，浸水痕跡調査結果よりも浸水深さが大きく推定された．これは，浸水深さメッシュが実際の浸水域の境界部を精細に再現できず，浸水面の標高を高精度に推定できなかったことが一因であると考えられる．また，浸水痕跡調査結果に対する各浸水深さメッシュの平均誤差は，境界部の平均値を使用した場合で-0.97m，最大値を使用した場合で，3.69m となった．境界部の平均値を使用した場合は誤差が比較的小さく，約 1.00m の精度で浸水深さを推定した．しかし，浸水深さは浸水域の境界部の標高を参照し推定するため，その精度は，浸水域の抽出精度に依存すると考えられる．そのため，高精度に浸水深さを推定するには，浸水域の境界部の抽出精度向上が必要である．

4.おわりに

本研究では，オープン形式の SAR 画像を用いて浸水域の抽出および浸水深さの推定を試行した．その結果，令和元年東日本台風による那珂川流域の一部の浸水域にて，実際の約 6 割の面積が抽出できた．したがって，オープン形式の SAR 画像を用いた解析により，河川の氾濫による浸水域の形状を再現できる可能性を示唆した．さらに，浸水深さメッシュは，浸水痕跡調査結果と比較し平均誤差が約 1,00m となり，浸水深さの実測値が概ね再現された．また，各解析処理は，浸水域の抽出と浸水深さの推定のそれぞれの場面において無償で公開されているソフトウェアを用いて半自動で実行した．以上より，オープン形式の SAR 画像を用いて浸水域を概略的に把握する手法の適用可能性が示された．本研究で提案した SAR 画像の解析処理のフレームワークを使用し，誰にでも容易に国土の解析が可能になれば，国土の定常的な監視やインフラ管理の高度化の推進に寄与できると考える．

今後は，浸水域の抽出における変化指標の適切な閾値設定や浸水域ポリゴンの抽出精度向上に加え，広域の浸水被害を把握する手法の用途展開に取り組む．そして，建物の浸水被害の把握や，浸水による経済被害の推定等の活用方法を模索する．

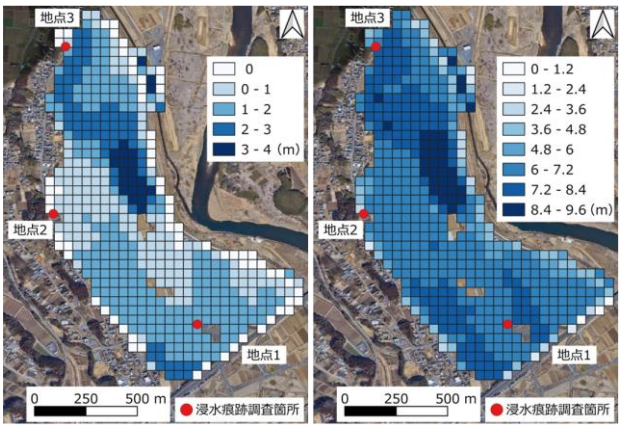


図-3 浸水深さメッシュと浸水痕跡調査箇所の重畳結果

表-3 浸水深さの実測値と推定結果の比較結果（m）

比較項目	地点 1	地点 2	地点 3
浸水痕跡調査結果	3.24	0.44	1.74
浸水深さメッシュ 境界部の平均値使用	1.17	0.00	0.89
浸水深さメッシュ 境界部の最大値使用	6.66	3.18	6.46

謝辞：本研究で使用した Sentinel-1 の SAR 画像は ESA の Copernicus Open Access Hub より提供された．

参考文献

1) 飯田 洋，渡辺 信之，佐藤 潤，小荒井 衛：高分解能 SAR を利用した災害状況把握，国土地理院時報，99 集，pp. 49-56，2002.
2) 水野正樹，神山嬢子，江川真史，佐藤匠，蒲原潤一，林真一郎：単偏波の高分解能SAR画像による河道閉塞箇所判読調査手法（案），国土技術政策総合研究所資料，第 760 号，2013.
3) 白水 元，金城 海輝，山本 晴彦，朝位 孝二：合成開口レーダーを用いた浸水域および浸水深の推定法に関する研究，土木学会論文集 B1（水工学），75 巻 2 号，pp. I_1471-I_1476，2019.
4) 陰山 建太郎，野間口 芳希，赤畠 義徳，松岡 裕幸，柴垣 昂平，金子 明生，穴原 琢摩，西澤 駿人：令和 2 年 7 月豪雨における衛星を活用した浸水域の抽出について，土木学会論文集 B1（水工学），77 巻 1 号，pp. 150-157，2021.
5) ESA：SNAP Download，<https://step.esa.int/main/download/snap-download/>，（入手 2023.6.12）．
6) QGIS：QGIS プロジェクトへようこそ!，<https://qgis.org/ja/site/>，（入手 2023.6.12）．
7) 国土地理院：基盤地図情報ダウンロードサービス，<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>，（入手 2023.6.12）．
8) 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>，（入手 2023.6.12）．
9) 茨城大学：令和元年度台風 19 号災害調査団 中間報告書，<https://www.ibaraki.ac.jp/uploads/IU2019hagibisresearch2ndreport_1.pdf>，（入手 2023.6.12）．