

異種衛星画像を用いた浸水災害を対象とした  
災害対応フェーズの災害情報抽出手法に関する研究

令和元年9月

園部雅史

## 目次

1. 序論	4
1.1. 研究の背景	4
1.2. 近年の光学・SAR 衛星画像の現状と災害情報の取得における特徴	8
1.2.1. 衛星による地球観測衛星の歴史と近年の動向	8
1.2.2. 近年の衛星による災害情報の抽出の動向	16
1.3. 衛星画像による浸水被害領域の時系列把握手法における課題	18
1.4. オープンデータによる空間情報の利用	21
1.5. 研究の目的	23
1.6. 本論分の構成と内容	25
1.6.1. 災害直後フェーズによる衛星画像を用いた浸水域の抽出	25
1.6.2. 復旧・復興フェーズによる衛星画像を用いた浸水域の抽出	40
2. 災害直後フェーズにおける浸水域の抽出の検討	47
2.1. 研究概要	47
2.1.1. 光学画像データの NDWI 指標を用いた単画像による浸水域の抽出	47
2.1.2. SAR データの単画像による浸水域の抽出	48
2.1.3. 浸水域の抽出における衛星画像の課題の整理	49
2.2. 光学衛星画像データによる GSI 指標を用いた浸水域の抽出および改善手法の提案	50
2.2.1. 使用データ	51
2.2.2. 光学衛星画像による浸水域のスペクトル調査	55
2.2.3. 差分解析による浸水域の抽出	57
2.2.4. GSI 指標を用いた浸水域の抽出と精度評価	59
2.2.5. DEM データおよび空間処理による改善手法の提案	61
2.2.6. 街区データを用いた改善手法の提案	62
2.3. SAR 画像データによる浸水域の抽出と改善手法の適用性の評価	66
2.3.1. 使用データ	66
2.3.2. SAR 衛星画像における後方散乱係数画像の生成	67
2.3.3. コヒーレンス画像の生成	69
2.3.4. 災害前後カラー合成画像および差分画像の特性把握	70
2.3.5. 差分画像による浸水域の抽出と評価	72
2.3.6. DEM データおよび空間処理による改善手法の提案	73
2.3.7. 2 時期のコヒーレンス画像による建物情報の抽出	74
2.3.8. コヒーレンス値を用いた建物位置の特定手法の開発	77
2.4. 中分解能光学・SAR 衛星画像データによる津波被害域の抽出の評価	81
2.4.1. 使用データ	81
2.4.2. 光学衛星画像における衛星画像の前処理と正規化植生指標値の算出	85
2.4.3. SAR 衛星画像における後方散乱係数画像および MTC 画像の生成	86
2.4.4. 品質評価データを用いた雲箇所補正	87
2.4.5. 対象範囲における NDVI 値の構成比と津波被害域の抽出	89
2.4.6. 精度評価	91
2.4.7. MTC 画像と目視判読結果の比較	92
2.5. 本章のまとめ	95

3. 復旧・復興フェーズにおける衛星画像を用いた津波被害域の調査.....	97
3.1. 研究概要.....	97
3.2. 時系列データセットの構築.....	97
3.2.1. 使用衛星データ.....	98
3.2.2. パンシャープン画像と正規化植生指標値画像の作成.....	99
3.2.3. 海岸林領域の抽出と空間情報への変換.....	102
3.3. 沿岸域の周辺インフラの変化過程の判読調査.....	103
3.3.1. 海岸堤防の変化過程.....	104
3.3.2. 復興道路の変化過程.....	105
3.3.3. 海岸林の変化過程.....	106
3.4. 正規化植生指標値による海岸林の変化過程の評価.....	107
3.4.1. 沿岸域における土地造成被覆の変化過程.....	108
3.4.2. 海岸林領域における海岸林の変化過程.....	109
3.4.3. 海岸林領域の NDVI 値の構成比による特性.....	110
3.5. 正規化植生指標値の差分解析による海岸林の変化過程の評価.....	113
3.5.1. 差分画像による災害3年後以降の植生域の増減.....	113
3.6. 本章のまとめ.....	115
4. 結論および展望.....	116
4.1. 本研究の結論.....	116
4.2. 今後の展望と課題.....	120
参考文献.....	121
謝辞.....	126

## 1. 序論

本論文は、災害大国である日本における災害対応において重要な役割を担う災害初期の被害情報の収集と適切かつ継続的な復旧・復興モニタリングについて、衛星画像の解析手法を提案するとともにその有用性について検討したものである。

### 1.1. 研究の背景

平成は災害の時代と言われている。多くの災害は予期なく、我々の前に立ちはだかり多くの人命とインフラに被害を与えてきた。火山災害であれば、平成6年の雲仙普賢岳の火砕流、平成23年の新燃岳の爆発的噴火、平成26年の御岳山の水蒸気爆発による爆発的噴火など、火山灰、噴石や塵、火砕流などによる被害により、人命やインフラだけではなく自然環境への損害も多く言われている。加えて、地震による災害として、2回にわたりプレート境界面のずれが要因となり発生した平成23年の東日本大震災による津波は太平洋沖の沿岸域に襲来し、多くの人命や沿岸構造物、海岸林などに甚大な被害を与えた。また、平成7年の阪神・淡路大震災や平成28年熊本地震、さらには平成28年の鳥取県中部地震、平成30年大阪北部地震などが発生している。特に阪神・淡路大震災では市街地直下地震として道路をはじめとした都市主要インフラや家屋の倒壊被害が顕著であったことや主に電気器具などによる出火が原因で家屋の火災が広域に発生したことが特徴である。また、平成28年熊本地震では、阿蘇山周辺の広範囲に大規模な土砂災害が発生したことや、益城町で木造家屋の倒壊が多く発生したことが報告されている。梅雨時期における台風・豪雨災害では近年のゲリラ豪雨により、短時間豪雨などの異常気象が多く発生している。これにより、堤防の決壊による浸水被害が多く発生しており、平成27年9月関東・東北豪雨や平成30年7月豪雨による大規模かつ同時多発的な浸水被害は記憶に新しい。また、短時間豪雨による土砂災害も多く発生し、谷沿いの家屋や周辺インフラ、さらには河道閉塞が発生するなど、今後の早急な防災対策が必要であるといわれている。このような災害が発生した場合、規模や被害の程度から内閣府や自治体により「災害対策本部」が設置され、自治体をはじめとしたさまざまな機関や民間企業による被害調査が行われている[1]。これらは「災害協定」などの政府指定行政機関や自治体などの機関、あるいは民間企業との協定約款に基づいて行われる。それぞれの災害調査機関の特色を活かした調査方法や観測ツールを駆使して調査を行うことになっており、オールジャパンとしての災害調査や減災のための仕組みづくりが求められている。このような政府指定行政機関や自治体を補佐するための取り組みとして文部科学省が提唱し、平成26年度から始まっている戦略的イノベーション創造プログラム（SIP：Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program）事業の内、レジリエントな防災・減災機能の強化を目的とした課題がある。この事業では衛星、AI（Artificial Intelligence）、ビックデータなどを利用する国家レジリエンスの強化として新技術の研究開発を目的とし、開発したシステムの政府と自治体への換装を目標としている。早急な災害対応立案のための被害概要調査やその後のしなやかな復旧・復興計画の立案のためのソフト面からの対応ツールや施策などを検討している[2]。

上記のような取り組みは、近年災害の被害の大規模化や集中豪雨などの多様化、加えて今後発生が懸念されている首都直下地震や南海トラフ地震に対するソフト対策として期待されている。南海トラフ地震は平成14年7月、議員立法により、「東南海・南海地震に係る地震防災対策の推進に関する特別措置法」が公布され、災害対策基本法に基づく平成16年防災白書[3]によると、平成13年に専門調査会を発足し、被害想定や対応策が検討されている。首都直下地震も同様に平成15年から専門調査会を発足し、被害予測や防災体制の総点検と体制確立のための検討を行っている。いずれの災害も大規模かつ甚大な被害が予想され、防災・減災のた

めの対応が急務である。また、東京都では東京都震災復興マニュアル（復興施策編）を纏めており、被災後2週間以内に復興方針を都民に対し明示することを掲げている。そのため、災害直後の家屋などの被害把握は迅速かつ効果的に実施する必要がある、あらゆる手段を組み合わせた被害情報の収集が必要となっている。

世界の災害における日本の災害の割合を図1.1[4]に示す。自然災害による死者・行方不明者の数を図1.2に示す[5]。このように日本は世界的にも火山、地震、津波、豪雨が発生する可能性が高い災害大国であるからこそ、さまざまな災害ケースを想定し、多様な技術を駆使、あるいはコンビネーションして災害発生時のスムーズ且つ効果的な初動対応、あるいは避難勧告・指示を検討する必要がある。また、被災地の継続的な復旧対応の計画、そしてその後の有益な地域特性を生かした復興計画や二次災害を防ぐためのハード面の構築などを計画する必要がある。また、これらを大局的に俯瞰して計画の進行状況を把握するツールが必要である。

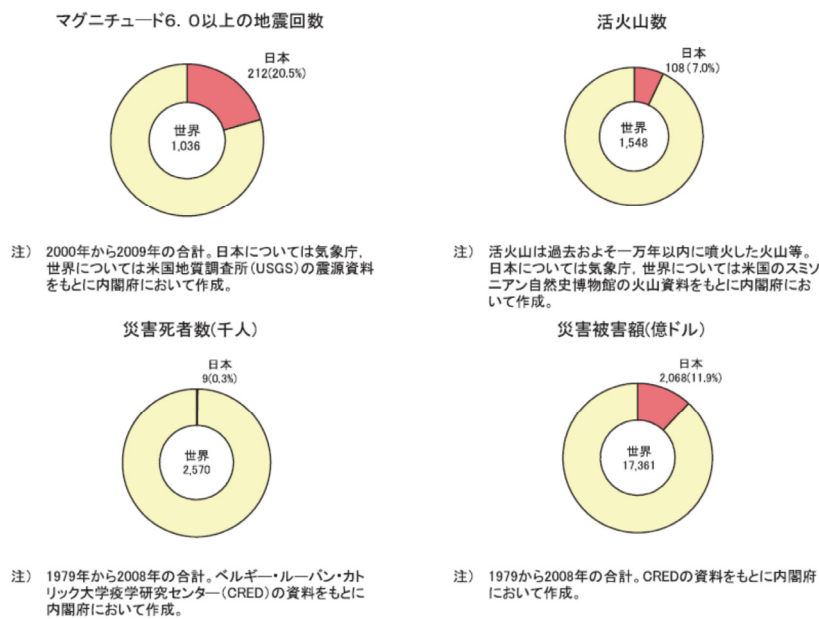


図 1.1 世界の災害における日本の災害の割合[4]

(単位:人)

年	風水害	地震・津波	火山	雪害	その他	合計
平成5年	183	234	1	9	11	438
6	8	3	0	21	7	39
7	19	6,437	4	14	8	6,482
8	21	0	0	28	35	84
9	51	0	0	16	4	71
10	80	0	0	28	1	109
11	109	0	0	29	3	141
12	19	1	0	52	6	78
13	27	2	0	59	2	90
14	20	0	0	26	2	48
15	48	2	0	12	0	62
16	240	68	0	16	3	327
17	43	1	0	98	6	148
18	87	0	0	88	2	177
19	14	16	0	5	4	39
20	22	24	0	48	7	101
21	76	1	0	35	3	115
22	31	0	0	57	1	89
23	136	22,203	0	125	2	22,466
24	52	0	0	138	0	190
25	75	0	0	92	6	173
26	112	0	63	108	0	283
27	28	0	0	49	0	77
28	45	267	0	32	0	344
29	59	0	0	77	0	136

注) 本表は、対象年の1月1日から12月31日の死者・行方不明者数を表す。  
 平成29年の死者・行方不明者は内閣府取りまとめによる速報値  
 (平成23年の「地震・津波」欄のうち、東日本大震災分は、「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)」について(平成30年3月7日)により、死者による死者(震災関連死を含む)・行方不明者22,199人となっている。)  
 出典: 消防庁「地方防災行政の現況」をもとに内閣府作成

図 1.2 自然災害による死者・行方不明者の数[5]

地表面状況を把握する手法として衛星観測画像による把握手法が近年、活用されてきている。衛星による地球観測は1972年にNASA (National Aeronautics and Space Administration) により始まった。当初、Landsat は地球観測や資源探査を目的に利用され、これまでに Landsat-8 号まで継続して運用されている。また、8号と同様の性能を有する Landsat-9 号が2020年に打ち上げ予定である。政府系衛星運用機関においては、公共インフラとしての確立、異分野における新たなサービスの創出を期待して中分解能衛星画像クラスのデータはフリーに衛星画像を取得できるようになってきた。日本においても2006年から2011年まで運用された陸域観測技術衛星（以降、ALOS : Advanced Land Observing Satellite）（図 1.3 参照）による観測画像を一部フリーに公開し、新たな利用方法や空間情報としての利用が期待されている。

また、近年では分解能が1mより小さく、細かく地表面状況を把握できる衛星が運用されている。これらは、高分解能衛星と呼ばれ、公的利用が中心だが、欧米では衛星データの利用拡大と商業化を前提としてアンカーテナンシーや公民連携 (PPP : Public-Private Partnership) などにより、民間の活力を活用した方策のもと運用されている。また、民間業者による衛星の打ち上げと同様に独自の小型の衛星バスを開発し、大量生産により多くの衛星バスを運用し、これまで社会実装における一番のネックであった観測機会の低さに対し、小型衛星を多く利用することによって解決し、さまざまなモニタリングサービスに利用するベンチャー企業が国内国外問わず、増加している。このような動向からも今後、衛星画像の利用は我々の生活に無くてはならないツールになりえる可能性がある。この背景として内閣府による宇宙政策委員会宇宙産業振興小委員会が発行する「宇宙産業ビジョン 2030」においても衛星画像の利用による宇宙活動の産業化やコスト低下による宇宙利用ユーザの拡充が記載されており、宇宙産業の増加は今後の10年で国内・国外問わずパラダイムチェンジすると予想されている[6]。

このような日本を含む世界的情勢から多様な分野で衛星画像が利用されるであろう社会になることが予想され、減災、復旧、復興活動を総称する防災活動においても利用されることが期待されている[7]。日本国においても国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（以降：JAXA : Japan Aerospace Exploration Agency）をはじめとし、災害発生時には衛星画像による被害域の抽出や二次災害危険地区の推定が行われており、防災利用実証として協定を締結する政府指定行政機関や地方自治体と連携し、衛星画像からの抽出結果の精度向上や利便性の向上を検討している[8], [9]。

これまでの衛星画像にまつわる状況を踏まえ、本研究では光学・レーダ衛星画像および空間情報を併用した災害情報の抽出精度の向上や多様な衛星によるコンステレーション利用（図 1.4 参照）を踏まえた検討を行うこととする。

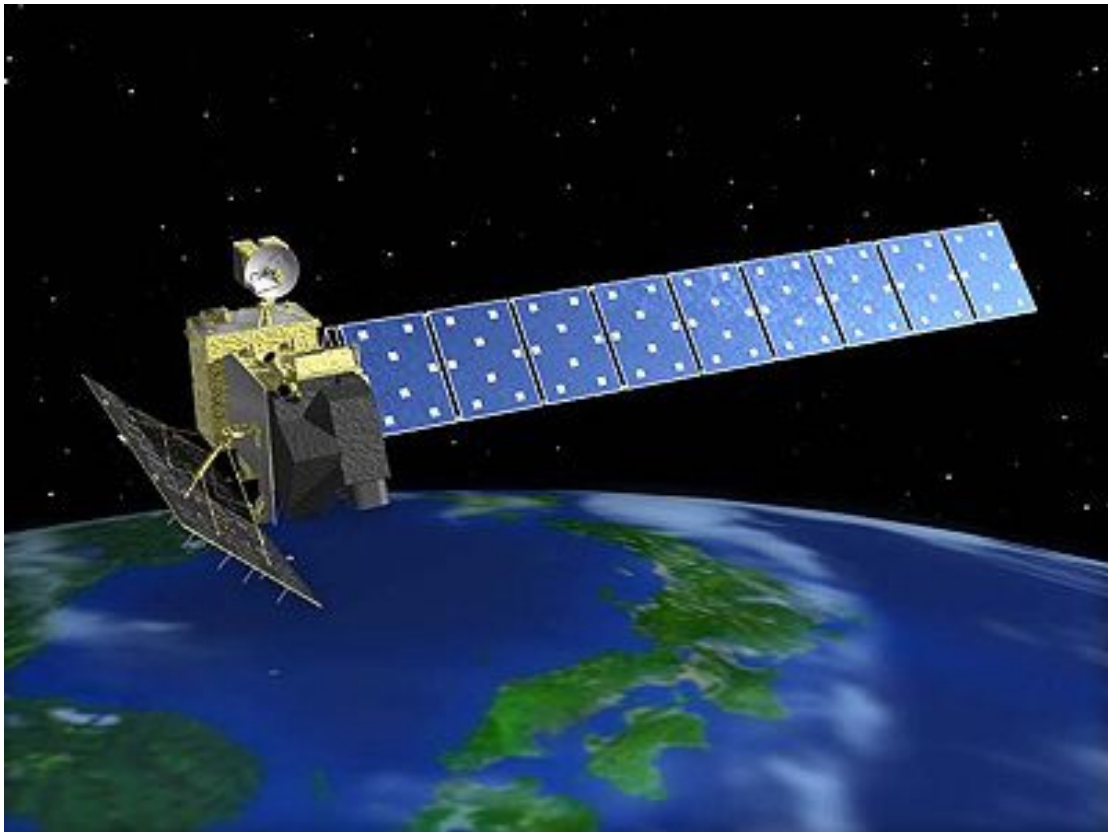


図 1.3 陸域観測技術衛星（だいち）<sup>[10]</sup>

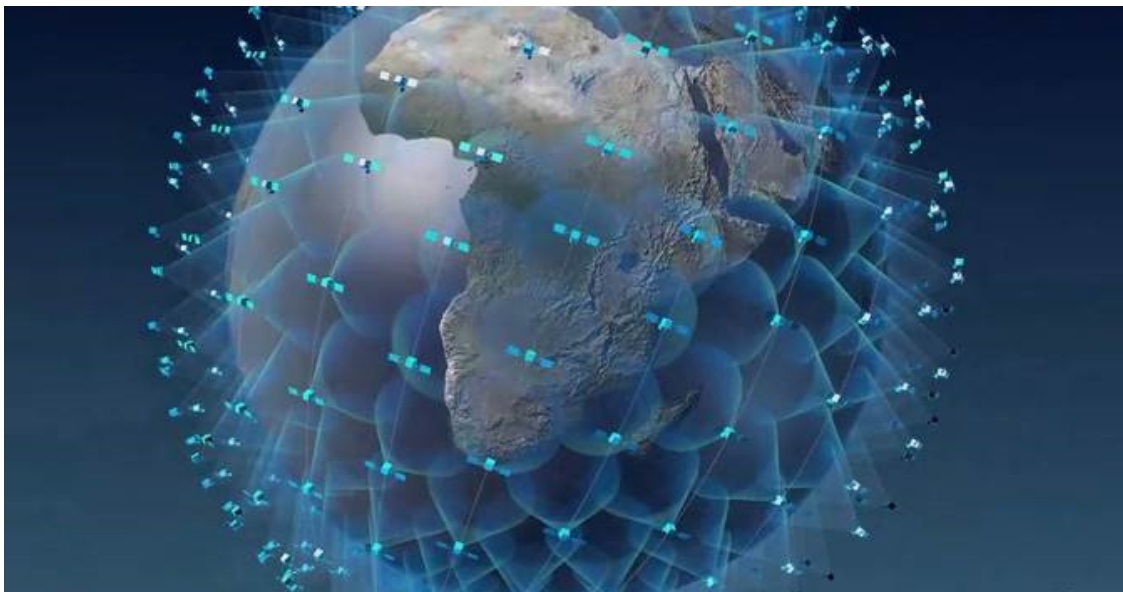


図 1.4 衛星コンステレーションによる地球観測のイメージ図<sup>[11]</sup>

## 1.2. 近年の光学・SAR 衛星画像の現状と災害情報の取得における特徴

### 1.2.1. 衛星による地球観測衛星の歴史と近年の動向

ここで衛星による地球観測の歴史について述べる。海外においては 1972 年に打ち上げられた NASA の地球観測衛星「Landsat-1」(ランドサット 1 号)を皮切りに始まった[12]。この打ち上げの目的は、米国国務省による資源管理と地球研究のための地球モニタリング衛星計画から成るものであり、Landsat-1 は、穀物の収穫予測、土地利用、資源探査などさまざまな利用の地歩を築いてきた。これまで 8 号機まで継続的に打ち上げられている状況であり、衛星による地球観測を牽引してきた[13]。2020 年には Landsat-9 が打ち上げ予定であり、継続的なデータの蓄積による時系列変化の把握による土地利用の変遷の調査が今後も期待されている。これらは政府系衛星と呼ばれ、政府あるいは関連行政機関による運用、管理がなされ、2008 年後半から Landsat データが一般無償公開(オープン&フリーポリシー)されている。同様の政府系衛星として欧州では、欧州連合(EU: European Union)の主要プログラムの一つとして、宇宙データ利用促進政策は地上、海上及び大気の状態監視と市民の安全向上とともに、経済成長と雇用を促進するための地球観測データ利用システム(Copernicus 計画)を立ち上げ、Sentinel-1 から Sentinel-6 の複数衛星によって構成されている[14]。2011 年に Sentinel-1 を打ち上げてからこれまで 5 機の衛星を打ち上げ、取得画像が一般無償公開されている。日本の地球観測衛星の歴史としては、1987 年に打ち上げられた地球観測衛星「もも 1 号」に始まる。その後、高分解能化などのチューンアップが繰り返され、多くの衛星画像を蓄積し続けた。現在は陸域観測技術衛星 2 号(以降、ALOS-2)が運用され、インフラマネジメントや災害時で利用され、従来の衛星画像の提供のみから衛星画像から抽出された情報・知識の提供への付加価値としての利用になってきている。また、2020 年には先進光学衛星やその後先進レーダ衛星の打ち上げ、運用が計画されており、継続的な衛星観測による衛星情報インフラとなりつつある。また、特に米国においては 1999 年より IKONOS 衛星が打ち上げられ、高分解能衛星画像の商用利用が始まった。IKONOS 衛星により取得された衛星画像は光学式センサであり、可視光域(VIS: Visible)の 3 バンド、近赤外域(NIR: Near Infrared)の 1 バンドを含む 4 バンドのマルチスペクトルで分解能が 4m、パンクロマティックで 1m 程度であり、衛星画像による高精細な情報抽出の新時代の幕開けとなった。その後、さらにマルチスペクトルの多バンド化や高分解能化による光学式センサが開発され、2014 年に打ち上げられた WorldView-3 では、8 バンドマルチスペクトルで 1.2m、パンクロマティックで 0.3m 程度と高精細な衛星画像による情報取得が可能となった。このように詳細かつマルチスペクトル情報から地表面な情報を衛星画像から調査が可能になってきている。

各運用機関における地球観測サービスの分類を図 1.5 に示す通り、衛星画像には観測範囲が広い中分解能・観測範囲が狭い高分解能衛星画像がある。中分解能衛星画像は政府系衛星による取得された画像の傾向があり、多様なニーズの創出やサービス化の促進を目的とて政府あるいは政府系企業により一般無償公開されている場合が多い。これらは米国の NASA, USGS (United States Geological Survey) による Landsat シリーズ衛星画像、欧州の Copernicus 計画の関連機関あるいは企業から見てもわかる。

近年、Landsat シリーズや Sentinel シリーズの政府系衛星により取得された中分解能衛星画像データはオープンデータ化され、特に欧米では政府のオープンデータ政策の一環として、衛星データのアクセスを容易にすることで利用開拓を支援するため、基本的には政府系衛星データのオープン&フリー政策が導入されている。このような世界情勢の動向から日本国においても、欧州と同様に、一部の高分解能の政府衛星データはデータ配布業者から有償で提供されているが、今後、有償、無償の整理も含めた欧米における取組状況や必要性、安全保障上の観



点に留意しつつ、国際的に同等の水準でオープン&フリー化を進めていく必要があるとされている。

日本においては、現在運用中の ALOS-2 は政府系衛星に分類されるが、PPP 事業として民間企業にデータベンダー事業を委託して、有償による一般配布がされている状況である。なお、過去に運用されていた衛星画像においては一部、一般無償公開されつつある。

近年に発生した多くの災害に対し、日本国においては多様な観測ツールを利用した災害情報の取得に向けて多くの観測機器による災害評価や情報共有プラットフォームを利用した即自的な情報共有による減災を図ろうとしてきた。このような観測機器に対し、さまざまな特性を持つ地球観測衛星や気象衛星なども観測ツールの一つであり、広域かつ周期的な特性を生かした災害情報の利用が期待されてきている。

その他観測ツールに対する衛星の特徴として、衛星画像の広域性や周期性の 2 つがまず挙げられる。その他ツールとの比較図を図 1.6 に示す。近年、急速に普及しつつある無人航空機（以降、UAV : Unmanned Aerial Vehicle）は飛行制限を有しているため、最高でも上空 150m 程度の観測が可能である。そのため、一般的に高解像度の画像を取得できるが、広域性には乏しいという特徴を持ち、災害での利用を想定すると局所的な被害個所の詳細調査が主要な利用方法ではないかと考えられる。加えて、現地に操縦者が出向くことが必要であり、比較的成本がかかることが挙げられる。また、天候の影響を受けるという制約を持つ。航空機やヘリによる調査は UAV よりも広域ではあるが、セスナやヘリの近隣飛行場の配備状況の制約があることが挙げられ、UAV と同様に安全性の観点から有視界飛行のため、天候の影響を受けやすい。

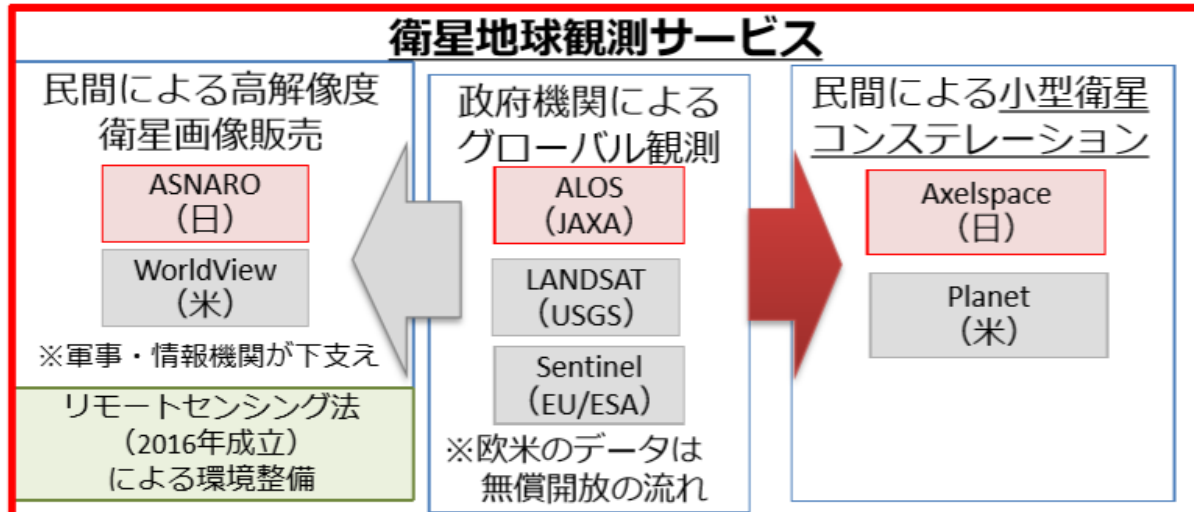


図 1.5 各運用機関における地球観測サービスの分類<sup>[15]</sup>

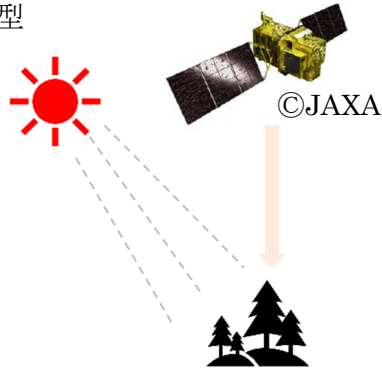

	ツール	天候の影響	調査範囲	利点	観測(調査)の課題
高↑ 対地高度 ↓ 低	衛星(SAR)	風・雲: 受けない	広い(面)	・広域、周期的に観測 ・全天候性で観測可能	・観測タイミングの制約
	衛星(光学)	風: 受けない 雲: 受けやすい	広い(面)	・広域、周期的に観測 ・被害情報の確認が容易	・観測タイミングの制約 ・被雲の影響を受ける
	セスナ	受けやすい	広い(面) ※衛星より狭い	・被害情報の確認が容易	・悪天候は飛行不可 ・被雲の影響を受ける
	ヘリ	受けやすい	広い(面) ※衛星より狭い	・被害情報の確認が容易	・悪天候は飛行不可 ・被雲の影響を受ける
	UAV	受けやすい	狭い(面) ※ヘリより狭い	・局所を詳細に把握	・悪天候は飛行不可
	現地調査	受けない	狭い(点)	・詳細調査が可能	・二次災害の危険 ・時間を要する

図 1.6 災害時の被害情報収集のための観測ツール

衛星画像においては、地上 500~700 km 程度の上空から地球を周回しながら観測するため、広域性と周期性が利点である。衛星に搭載するセンサの特性が観測画像の特徴となり、光学衛星と SAR 衛星の主な違いを表 1.1 に示す。具体的には太陽光の地表面の反射光を観測する光学衛星と衛星から送信したマイクロ波の地表面反射を受信する SAR 衛星で大きく分類される。

まず、地球観測衛星の初期から用いられている光学衛星は高性能カメラを搭載し、さまざまな観測波長帯のマルチスペクトル情報を観測可能である。パンクロマティックとマルチスペクトルの観測波長帯を図 1.7 に示す。多くの光学衛星は、空間分解能が高く（より細かく見える）、単一波長を観測するパンクロマティック（450nm-900nm 程度）と、パンクロマティックより分解能は劣るが、複数の波長を観測するマルチスペクトルをもつ。パンクロマティックは、単一波長のため通常白黒で表示されるが、マルチスペクトルは光の三原色である青（445-485nm）、緑（500-560nm）、赤（625-740nm）、および近赤外（750-1,400nm）の観測が可能であるためカラーで表示される。これらをカラー合成することにより人の視覚と同様の画像情報を得ることが可能である。一方、被雲などに遮られる場合は地表面状況の観測が困難である。光学衛星に対して SAR（Synthetic Aperture Radar）搭載衛星においては、Ka バンド（波長：0.75~1.2cm）から L バンド（15~30cm）の波長を用いることが多い。周波数の割り当てを図 1.8 に示す。マイクロ波帯を用いていることがわかる。図 1.9 に示すおとりに、一般に地球観測衛星における SAR 衛星では、X バンド（TerraSAR-X, COSMO-SkyMed）、C バンド（RADARSAT-2, Sentinel-1）および L バンド（ALOS, ALOS-2）を用いることが多い。L バンドから X バンドの波長帯のマイクロ波をセンサから送信し、地表面から返ってきた強度や波数を画像として表示するものである。これらの SAR 搭載衛星はマイクロ波波長帯のため、雲を透過するため被雲の影響を受けないとされる。

表 1.1 光学衛星と SAR 衛星の違い

	光学	SAR
概要	太陽の光を利用し、カメラを衛星より下方に向けることで被写体からの光を集め画像を生成	マイクロ波を斜め下方向に照射し、地表の凹凸による反射波の強度により画像を生成
波長	太陽の反射光（可視光・赤外線）を観測	衛星が照射するマイクロ波（Ka,L,C,X バンド）の反射強度を取得
センサ	受動型 	能動型 
観測	直下視・斜め	斜め
天候影響	悪天候時・夜間は観測困難	悪天候時・夜間でも観測可能

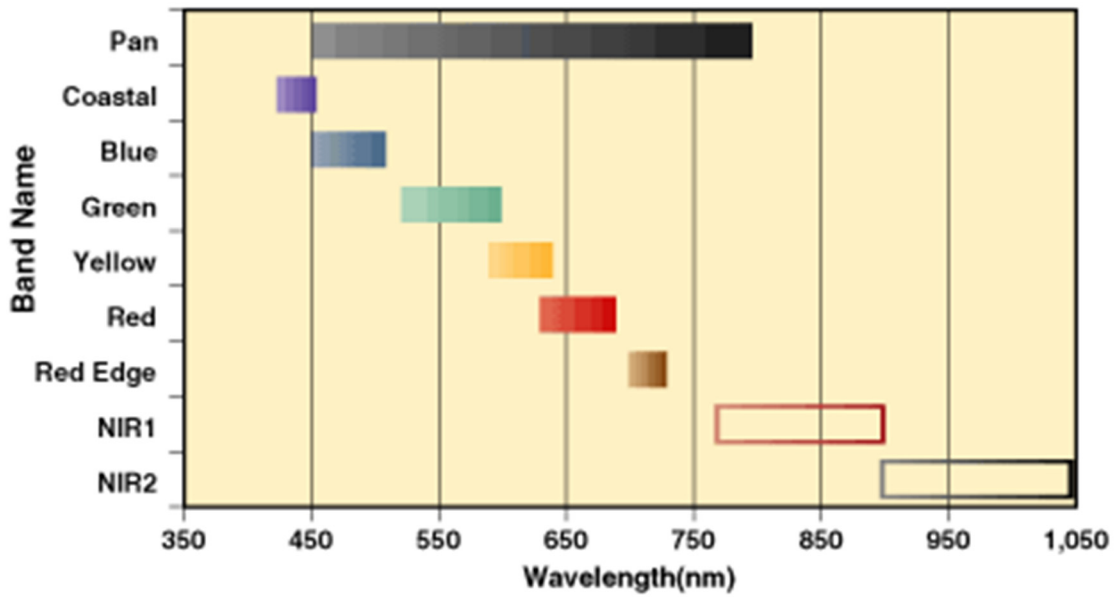


図 1.7 パンクロマティックとマルチスペクトルの観測波長帯<sup>[16]</sup>

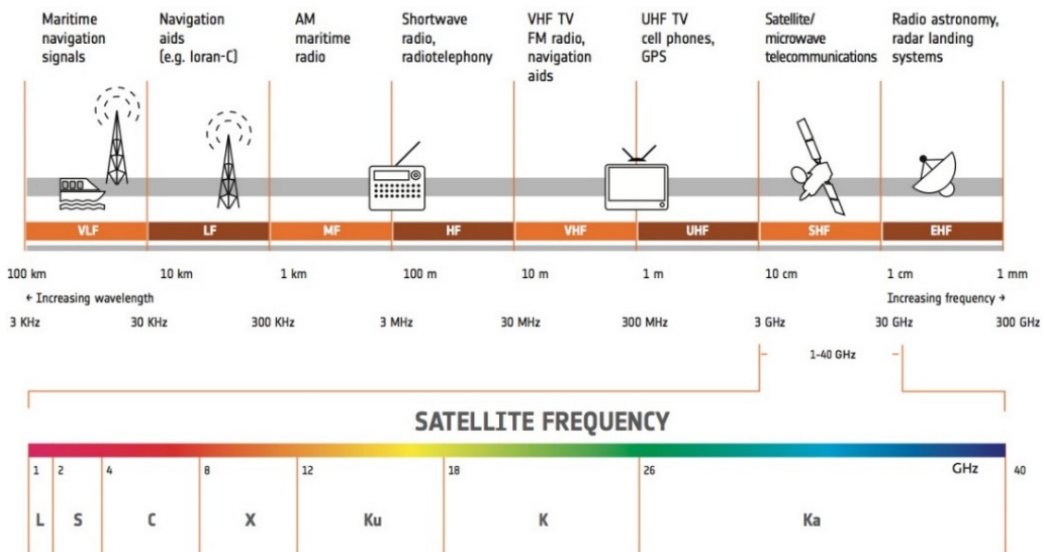


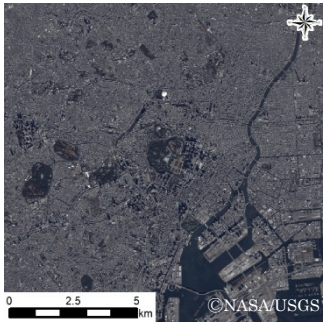
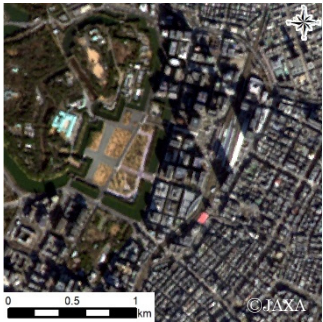
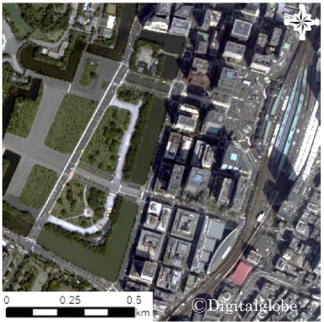
図 1.8 周波数・波長と使用用途の関係<sup>[17]</sup>



図 1.9 波長の違いによる反射の違い (ALOS-2 パンフレット) <sup>[18]</sup>

これに加えて、衛星画像には重要なパラメーターとして分解能があり、これは画像内のセルサイズがどの程度の大きさの地物や物体を表示できるかの尺度である。光学衛星画像における分解能と観測範囲の関係について表 1.2 に示す。明確に定義されているわけではないが一般に高分解能とはピクセルサイズが 1m 程度の大きさを指すことが多く、中分解能とは 3m から 10m のピクセルサイズの大きさの特性を持つ衛星センサを指す。一方でダウンリンクのデータ容量などの理由で高分解能であるほど観測範囲は小さくなる場合が多い。光学衛星画像の場合、一般に画像上である地物を認識するためには、その大きさ（面積）の概ね 1/5～1/10 程度の空間分解能が必要である。つまり、空間分解能が 0.3m×0.3m の衛星画像では、1.5m×1.5m～3m×3m 程度の地物を認識できると考えられる。そのため、それ以上の大きさ（面積）を持つ被害であれば判読可能と考える。

表 1.2 光学衛星画像の分解能と観測範囲

	分解能：低	分解能：中	分解能：高
解像度	10m～数 10m 程度	3m～10m 程度	0.3m～3m 程度
観測範囲	数 100 km	数 10 km	10 km～60 km
衛星例	Landsat-8, Sentinel-2 など	ALOS(AVNIR), SPOT, RapidEye など	WorldView, GeoEye- 1, ASNARO など
画像例	 <p>Landsat-8 衛星画像</p>	 <p>ALOS 衛星画像</p>	 <p>WorldView-3 衛星画像</p>



ここで、衛星画像による災害情報の抽出手法の動向に触れておく。衛星画像による災害情報の抽出手法としては前述した光学衛星と SAR 衛星による抽出手法ではそのセンサ特性を生かした抽出手法を採用している。基本的に両方の光学・SAR 衛星においても災害直後の観測画像と災害前に観測された画像（アーカイブ画像）を用いて変化を把握することにより、災害により変化した箇所として捉えることは同一である。異なる点として、光学衛星による災害情報の抽出としては、マルチスペクトル情報を生かし、その被災箇所の地域特性を考慮しながらバンド（観測波長帯）を選択、あるいはバンド間演算による指標値を算出することで災害による変化を捉える点にある。このように光学衛星においては被雲さえしなければ、豊富なマルチスペクトル情報を利用することで、被災による変化を抽出することが可能である。また、光学衛星の利点としては、取得された衛星画像を並べることで、直感的にその被害箇所を把握可能という点である。

光学衛星に対して、SAR 衛星はマイクロ波の波長により特性は異なるが、天候の影響を受けずに地表面状況の凹凸の変化を把握することが可能である点を利用し、建物の形状変化や浸水による地表面が滑らかになる変化を SAR 衛星画像に含まれる振幅情報や位相情報を利用することで被災による地表面変化として抽出するものである。

災害時における衛星画像の利用検討を行う上で、このような光学・SAR 衛星の特性や災害の種類、被災箇所の地域特性、さらに災害時や災害後の天候状況を踏まえて、衛星観測計画時点から検討する必要がある。

### 1.2.2. 近年の衛星による災害情報の抽出の動向

近年の日本では、平成 27 年 9 月関東・東北豪雨に見られる集中豪雨や平成 28 年熊本地震に見られる地震による土砂災害など、災害が多様化している。そのため、多くの観測ツールを利用した被害情報の収集が求められている。衛星による被害情報の収集としては、JAXA において地球観測衛星による災害時の利用においては内閣府や協定自治体などと協定を締結し、衛星画像の防災利用実証実験を実施している。最近では、平成 25 年から運用する ALOS-2 による緊急観測を実施しており、災害対応実施機関の災害時の応急手段の意思決定を検討する上でのツールとして利用されつつある。

国際的な取り組みにおいて国際災害チャータとセンチネル・アジアを紹介する。国際災害チャータは、宇宙機関を中心とする国際的な取り組みであり、「自然または技術的な災害時における宇宙施設の調和された利用を達成するための協力に関する憲章」として、1999 年に欧州宇宙機関 (ESA) 及びフランス国立宇宙研究センター (CNES) が提唱した、大規模災害時に宇宙機関の衛星データにより即時観測し、得られた衛星データをユーザ (政府指定行政機関など) に提供する国際協力の枠組みである[19]。2015 年 10 月時点の国際災害チャータ参加機関および主衛星を表 1.4 に示す。この取り組みに参加する宇宙機関間は無償の国際協力として、「最善の努力ベース (ベストエフォート)」で協力をおこなうこととしている。国際災害チャータの運用フローを図 1.10 に示す。日本においても JAXA がこの取り組みに参加し、2010 年 1 月ハイチ地震や 2010 年 12 月のコロンビアの洪水で ALOS が観測した有効な情報を提供した。また、2015 年 4 月ネパール地震では ALOS-2 で観測したレーダ画像から抽出した災害情報なども含め、提供しており、国際災害チャータの取り組みに貢献している。また、2011 年東日本大震災においては、後述するセンチネル・アジアの取り組みを通じて国際災害チャータの活動の内、地球観測衛星により観測された画像として 5,000 画像以上が提供され、衛星による災害情報の抽出に有効に効果的に利用された[20]。国際災害チャータと同様の取り組みで「センチネル・アジア」という取り組みで、アジア太平洋沖の自然災害の監視を目的とした国際協力プロジェクトが存在する[21]。これらは、地球観測衛星などの宇宙技術を用いて得た災害情報をインターネット上で共有し、各種自然災害を軽減、予防することを目的としている。2005 年に提唱され、現在 20 カ国、51 機関、8 国際機関が参加している。活動内容は国際災害チャータと同様であり、ベストエフォートの協力を行うものとしている。アジアは各大陸よりも災害が多いことや、災害に対するハード面のインフラ整備やソフトの整備が十分ではない国が多いことから、本取り組みによる災害時の情報抽出が期待されている。

これまで述べたように災害時の即時観測による被災箇所周辺の変化箇所の把握や、周辺インフラの被害把握などの災害情報の抽出が国際的にも期待されている。しかし、画像のみの提供が多く、被災地の地域特性を考慮した手法の適用や定量的なインフラ被害などの抽出、さらには衛星画像と GIS (Geographic Information System) データを一体的に用いた抽出・評価手法の確立には至っておらず、衛星画像およびその抽出結果の提供者の解析能力の向上が必要である。加えて、光学衛星画像は直感的に被害箇所の把握が容易であるが、レーダ衛星画像による被災箇所の把握は災害対応を行う政府、地方自治体などの職員による判読は困難であり、情報提供側の表現方法の工夫や情報提供方法を検討する必要がある。



表 1.4 国際災害チャータ参加機関及び主衛星 (2015年10月時点) [22]

参加機関	利用衛星
フランス国立宇宙センター (CNES)	Pleiades-1A,1B, SPOT-6,7
中国国家航天局 (CNSA)	SJ-9A
アルゼンチン国家宇宙活動機関 (CONAE)	SAC-C
カナダ宇宙庁 (CSA)	RADARSAT-2
ドイツ航空宇宙センター (DLR)	TerraSAR-X, TanDEM-X, RapidEye, constellation (5機)
英国宇宙庁/DMC インターナショナル・イメージング (DMC)	UK-DMC2 他
欧州宇宙機関 (ESA)	PROBA, Sentinel-1A, Sentinel-2A, ERS, ENVISAT
欧州気象衛星機構 (EUMETSAT)	Metop シリーズ Meteosat Second, Generation シリーズ Meteosat First, Generation シリーズ
ブラジル宇宙研究所 (INPE)	CBERS-01, 02, 2B
インド宇宙研究機関 (ISRO)	Cartosat-2, 2A, 2B Resourcesat-2, RISAT-1, Oceansat-2, IRS シリーズ, Cartosat-1, IMS-1
宇宙航空研究開発機構 (JAXA)	ALOS-2 (だいち2号), ALOS (だいち)
韓国航空宇宙研究院 (KARI)	KOMPSAT-2, KOMPSAT-3
アメリカ海洋大気庁 (NOAA)	POES, GOES
ロシア連邦宇宙庁 (ROSCOSMOS)	Kanopus-V Meteor-M RESURS-P RESURS-DK
米国地質調査所 (USGS)	Landsat シリーズ, QuickBird, WorldView-1, 2, 3, GeoEye-1, IKONOS

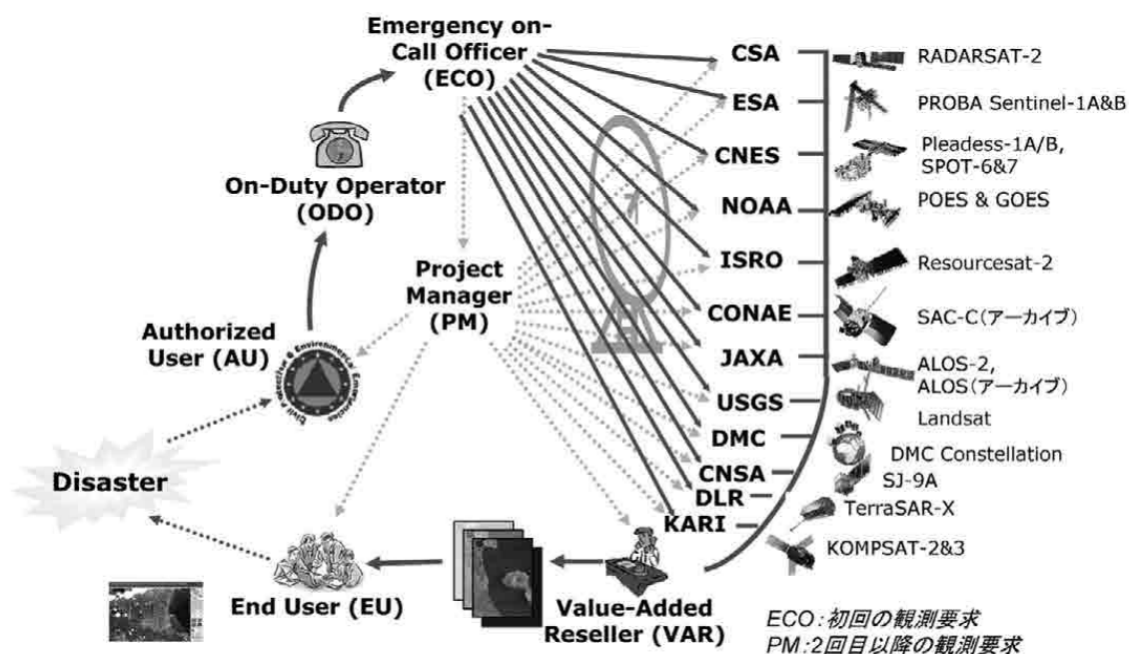


図 1.10 国際災害チャータの運用フロー [22]

### 1.3. 衛星画像による浸水被害領域の時系列把握手法における課題

様々な要因に起因する災害があるが、近年最も甚大な被害を与えたのは平成 23 年に発生した東日本大震災による津波被害と考えられる。津波による被害は南海トラフ地震でも懸念されている。また、平成 24 年 7 月、平成 29 年 7 月九州北部豪雨、平成 27 年 9 月関東・東北豪雨、平成 30 年 7 月豪雨などの台風や集中豪雨に起因する洪水被害が多発している。図 1.11 からわかるように 1 時間の短時間豪雨も増加傾向にあり、これら減災事業としてハード・ソフト面での対策が急務である。また、国連の報告によると世界においても洪水被害が増加していることがわかり、日本のみの問題ではないことがわかる（図 1.12 参照）。

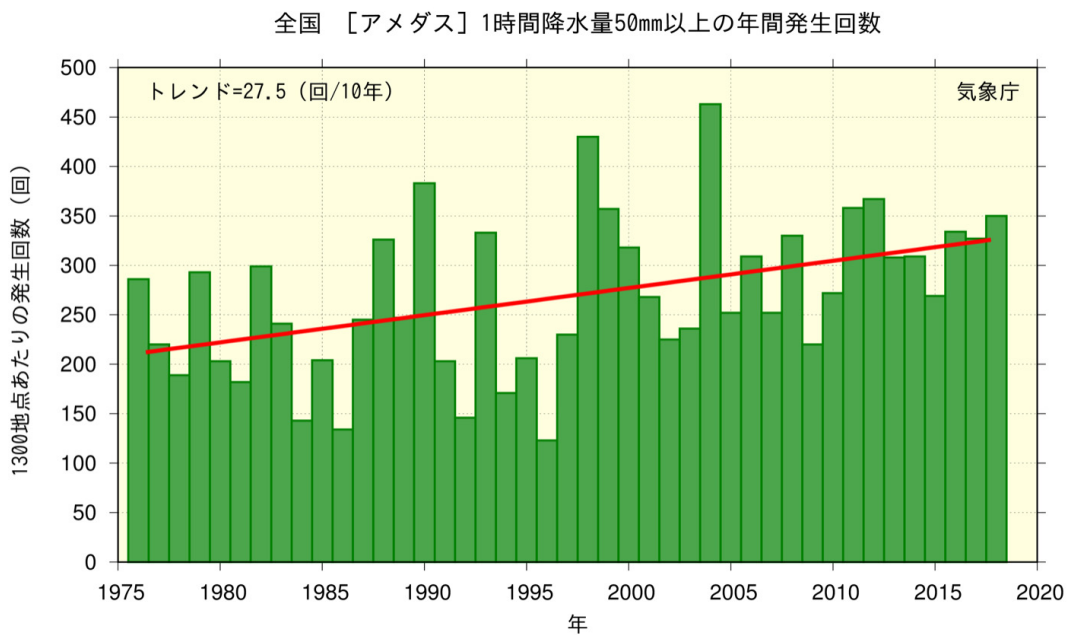


図 1.11 全国の 1 時間降水量 50mm 以上の年間発生回数の経年変化（1976-2018 年）<sup>[23]</sup>

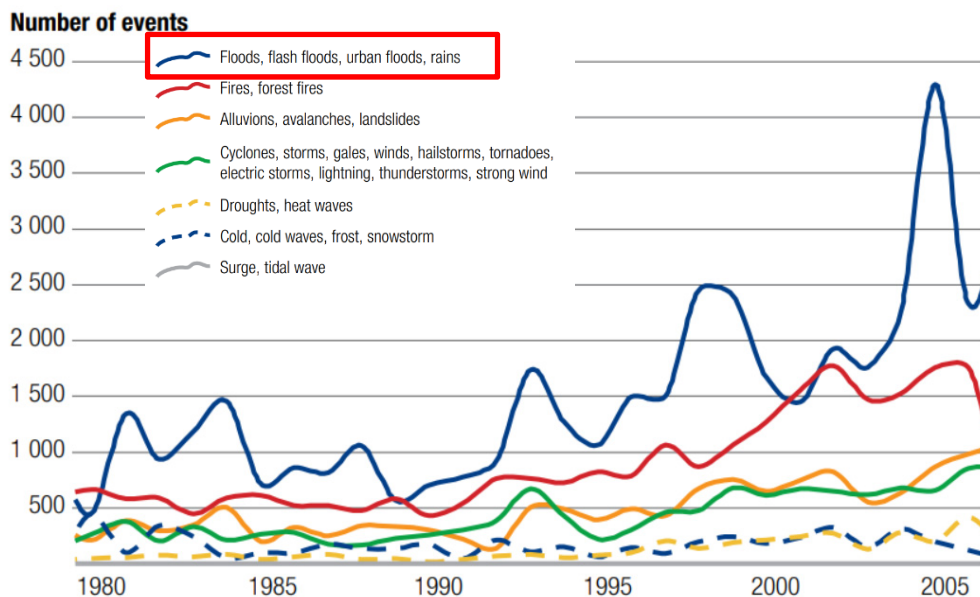


図 1.12 Number of flood and rain extensive risk loss reports (1980–2006)<sup>[24]</sup>

浸水被害が発生した場合、津波・越流や、堤防決壊による水流や泥流、あるいは瓦礫などの外力により、建築物やインフラに多くの被害を与える。そのため、浸水被害域を調査することは倒壊などの2次災害が発生しうる可能性のある個所を事前に把握し、災害直後の応急対策を検討する上で最も重要な情報である。また、災害に見舞われ、復興を必要とする場合は、建築基準法84条に基づき最大でも災害発生後の2か月間しか建築制限をかけることができない。その中で復興計画を検討する上でも被害状況は早急に把握する必要がある。このような理由から現状では、該当被災領域の管内の地方自治体や国土交通省緊急災害対策派遣隊（TEC-FORCE：Technical Emergency Control Force）による浸水跡の目視調査により浸水領域および浸水深の調査、または建物被害調査が実施されている[25]。浸水被害が広域な場合は、調査に時間がかかることや多くの人員が必要であること、さらには浸水被害による2次災害の危険性があり、応急対応の立案には迅速な調査が求められるが、慎重な調査が必要であることから効率的かつ正確な調査手法の確立が急務である。国内における衛星画像による浸水被害の把握は、ALOSが2006年に打ち上げられた後、行われてきた。しかし、衛星から取得した衛星画像による国内で発生した浸水被害の把握は運用上の課題が付きまどってきた。国内の浸水被害において最も重要であるのが、衛星による観測機会の制約である。国内における浸水被害は下水処理インフラの整備が十分にされていることから、海外諸国と比較すると浸水が引くことが比較的早い。一方、地球観測衛星は地球から500km～700km上空を南北に周回し、その間に地球が自転するため、世界中を観測することが可能であるが、災害時に衛星の位置によって、被害領域を観測するタイミングが限定されていることや直近の観測オーダーのコマンド送信時が衛星とアンテナの可視域である必要があるため、観測時間が柔軟ではない（図1.13、図1.14参照）。そのため、浸水被害と衛星観測のタイミングがマッチすれば広域に浸水域やその周辺被害を把握可能な強力なツールと成りえるが、観測タイミングを逃すと数日後の観測となる可能性がある。また、浸水被害時は台風、豪雨により悪天候である場合が多く、光学衛星による観測は被雲により地表面状況が把握できないリスクがある。そのため、衛星画像による浸水被害の把握は雲を透過するマイクロ波センサの特性を有するSARセンサの活用が提唱されてきた。特に国内においては、2014年に打ち上げられたALOS-2はLバンド帯のマイクロ波を採用して、打ち上げ以降の平成27年9月関東・東北豪雨や平成30年7月豪雨で発生した浸水被害の把握に用いられてきている。しかし、レーダ画像であることから観測画像の解釈あるいは抽出被害域の正当性が明確ではないことからその利用は、地方自治体には浸透していないのが現状である。このような背景から、衛星画像による浸水被害の観測ツールとしての位置づけとその効果的な利用方法について定めることや、光学およびSAR衛星の解析手法の定着化が必要であると考えられる。また、将来期待されている安価且つ短時間で開発可能な多種小型衛星による衛星コンステレーションでの利用も検討する必要がある。

衛星画像の解析による浸水域の抽出の課題として住宅密集地において、浸水の評価が困難である課題がある。光学衛星画像の家屋の観測においては、家屋の上部に位置する屋根の色情報や微細な壁情報のみしか得られず、衛星画像解析のみで浸水の可否を判定するのは難しいためである。SAR衛星のレーダ画像においても同様であり、建物形状の把握は高分解能衛星では有効であるが、その浸水状況を把握するのは同様に難しい。そのため、衛星画像のみではなく、地形情報やその他空間情報を利用した複合的な解析方法による抽出が必要であると考えられる。

浸水被害領域の災害後の応急復旧工事や復興対応の進捗状況を定期的に適切に把握することは、国土管理および保全の上で重要な要素である。内閣府による「復旧・復興ハンドブック」の被災状況などの把握の施策からも、復旧・復興の状況を継続的に把握し、タイムリーな施策を実施する必要があると記載されており、被災地の災害直後から復旧・復興過程を把握するこ

とは極めて重要であることがわかる[26]。衛星画像による観測は周期的に同地点を同条件で周回する軌道が採用されており、定期的な観測による復旧・復興過程の概要把握に長けている。また、他の観測ツールよりも精度、精細さは劣るが、定期的に利用可能な特徴を有している。このような政策および衛星画像の特徴がマッチすることは、今後の変化過程、すなわちその後の復旧・復興に効果的であることから衛星画像の利用が適していると考えられる。

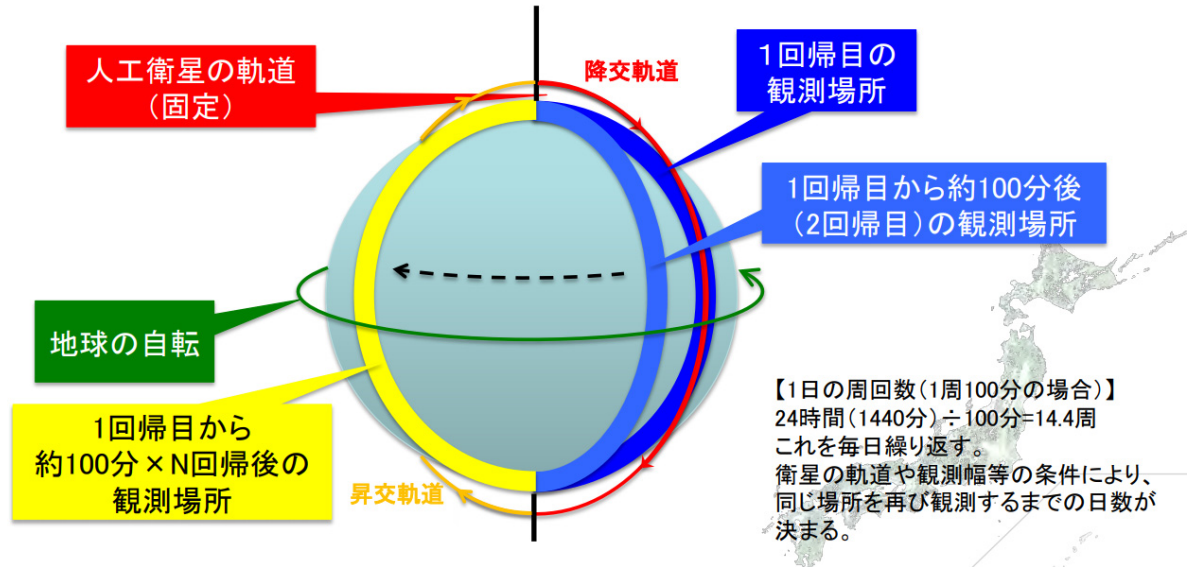


図 1.13 地球観測衛星の周回について[27]

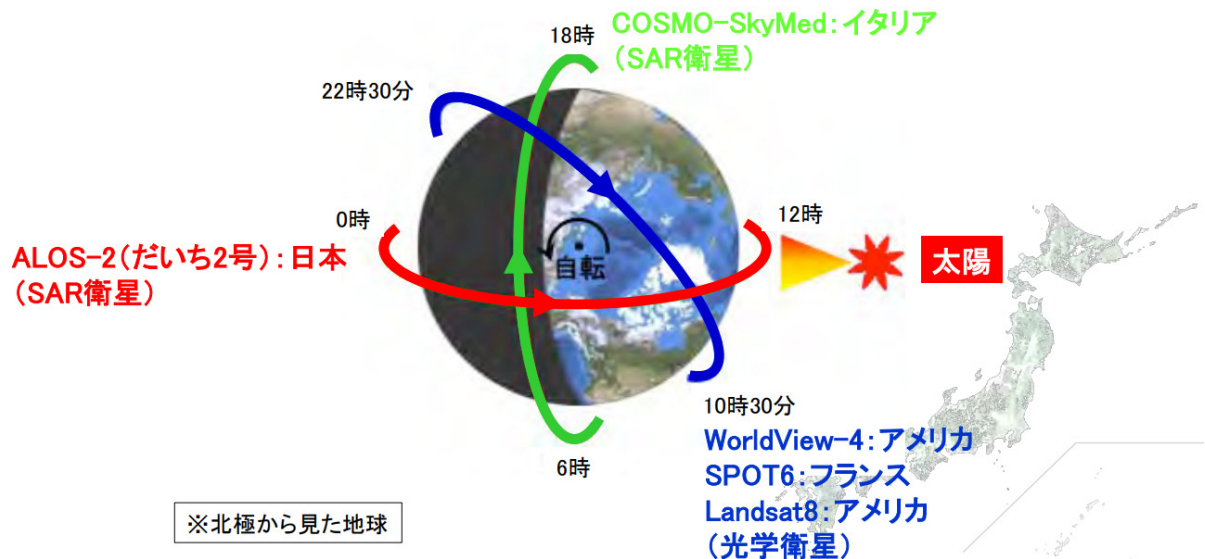


図 1.14 地球観測時間の観測時間[27]

#### 1.4. オープンデータによる空間情報の利用

平成 28 年度情報通信白書に記載する総務省によるオープンデータの利活用推進のイメージ図を図 1.15 に示す[28]。近年、総務省が管轄する国・地方公共団体、独立行政法人、事業者に対するオープンデータの推進により、空間情報データの公開、利用のアクセスビリティが向上している。このオープンデータの意義・目的としては、国民参加・官民協働の推進を通じた諸課題の解決、経済活性化、あるいは行政の高度化、効率化、透明性・信頼の向上としている。これらの空間情報は無償で利用することが可能であり、代表的なサイトとしては国土交通省が管理・運営する「基盤地図情報ダウンロードサービス」などがある[29]。このような状況から民間業者によるアプリケーションの開発が活発に行われている状況であり、社会課題の解決を背景とするビジネス展開が期待されている。

このような背景から政府、地方自治体が整備する災害時情報共有システム上で空間情報などのオープンデータの利用が検討されている。特に災害対応の訓練の内、台風や梅雨のシーズンの前に災害対応訓練を行う地方自治体および政府指定行政機関の職員が自ら災害時に想定される危険などを地図上に書き込んでいく防災図上訓練（DIG：Disaster Imagination Game）が行われる[30]。この防災図上訓練では被災領域の把握や被災に伴う二次災害の把握、さらには災害対応の人員や命令系統などの確認が行われるが、リスク、対応人員の視覚化が重要であり、地図情報システムの利用が有効とされている。政府の災害時情報共有システムの例として、国土交通省が 2014 年から運用し、国土地理院が管理する統合災害情報システム（DiMAPS）

（図 1.16 参照）があり、大規模災害発生時に、国土地理院が作成する地図上に、災害時に得られる震度情報や被災地の空中写真、被害情報、さらには従来から整備している基盤地図情報や数値地図情報をリアルタイムに重畳して表示することが可能であり、被災情報を迅速に把握し、各関連機関に共有することができる[31]。平成 30 年度の国土交通省の「災害情報の情報収集・共有体制の強化などによる災害対応力の向上」としての重点対策に統合災害情報システムの情報収集・共有体制を強化および地方公共団体や関連機関との情報共有体制を強化と掲げられ、被災情報や空間情報の災害対応時の利用が進んでいる[32]。地方自治体においては、徳島県が先進的に独自に空間情報などで構成される災害時情報共有システムを導入、運用しており様々な災害、訓練で利用されている[33]。

災害後に観測された衛星画像あるいは衛星画像から簡易的に抽出した被害領域の情報は、上記に挙げたシステムとの連携が行われ、Web 経由で地図画像を提供する仕組みが検討されている。WMTS（Web Map Tile Service）とは OGC（Open Geospatial Consortium）が定める GIS サーバーとクライアント間での地図データのやりとりを可能にする規格であり、これまでに災害時にネックであった大容量データである衛星画像のダウンロードを不要とし、短時間での衛星画像および抽出した災害情報の配信が可能となっている。一方、衛星画像による情報のみでは、詳細な被害の状態を知ることが困難であり、政府・地方自治体や政府指定行政機関が保有する地図・防災・災害情報を組み合わせることで、効果的な被害が可能である。このようなことから衛星画像および抽出した災害情報は推定被災情報としても扱うことが可能となり、各々の地域特性を持つ空間情報を主とするデータセットと併用することにより、災害対応の初動意思決定支援に利用可能となってきている。衛星画像および衛星画像から抽出した災害情報は重要な空間情報の一つであり、GIS データを併用して用いることは必要不可欠と考える。



図 1.15 総務省によるオープンデータの利活用推進<sup>[28]</sup>

## 災害情報をより早く、わかりやすく「DiMAPS」

統合災害情報システム（**DiMAPS**）は、地震や風水害などの自然災害発生時に、いち早く現場から災害情報を収集して、地図上にわかりやすく表示することができる、今までにない全く新しいシステムです。

素早く集めて、どこでも誰でも見ることが可能に。

**DiMAPS** は、震度情報や被災地の空中写真、被害情報などを、ほぼリアルタイムで地図上に表示します。このため、被害状況を迅速に把握し、共有することが可能になります。

震源・震度等に関する情報を発生直後に表示します。

全部まとめて、自由な大きさで見ることが可能に。

**DiMAPS** は、国土交通省が収集するインフラや交通関連の被害情報を集約して、拡大・縮小可能なシームレスな地図上で、統合して表示します。これにより、被害状況の全体像の把握と、その後の的確な意思決定を支援します。

**震源・震度**

防災ヘリが撮影した高画質な画像をリアルタイムで表示します。

**空中写真**

インフラや交通関連の被害情報を埋蔵を越えてスピーディーに表示します。

**インフラ・交通被害**

TEC-FORCEの活動状況を現場からダイレクトに表示します。

**TEC-FORCE**

情報を重ね合わせて表示

図 1.16 統合災害情報システム（DiMAPS）<sup>[31]</sup>

## 1.5. 研究の目的

本研究は、災害対応において重要な役割を担う災害初期の被害情報の収集と適切かつ継続的な復旧・復興モニタリングについて、衛星画像を用いた被害域の抽出のための解析手法を検討し、災害対応における有用性について把握することを目的とした。

災害直後フェーズにおいては、平成 27 年 9 月関東・東北豪雨および平成 30 年 7 月豪雨における茨城県常総市、岡山県倉敷市真備町の河川洪水による浸水被害や平成 30 年 12 月インドネシア・クラカタウ火山の火山活動によって発生した津波被害について光学・SAR 衛星画像と地理空間情報を併用した被害域の抽出手法とその適用性を検討した。手法の評価方法として、得られた浸水域抽出結果と国土地理院の空中写真の判読結果などを用いて精度評価を行った。

表 1.5 検討内容に対する課題と目的（災害直後フェーズ）

検討内容	課題と目的	課題に対する工夫 (新規性)	説明 箇所
災害前後の高分解能光学衛星画像情報を用いた浸水域のスペクトル特性の把握と浸水域抽出手法の検討	浸水域のスペクトル特性の把握	・浸水域のサンプリング ・バンドの選定	2.2
災害後のみの光学衛星画像を用いた GSI 値による浸水域の抽出手法の適用性の把握と空間情報処理による改善手法の検討	平時画像がない場合の対応	・NDWI 値に代わる GSI 値の提案	2.2
地理空間情報を用いた建物立地領域の浸水域の改善手法の検討	建物の立地領域の浸水域の把握	・街区ポリゴンによる補正手法の検討	2.2
災害前後の SAR 衛星画像から得られた後方散乱係数画像による浸水域の抽出とコヒーレンス画像による建物立地個所の浸水域の把握手法の検討	建物の立地領域の浸水域の把握	・建物ポリゴンとコヒーレンス画像による建物領域の補正手法の検討	2.3
準リアルタイム中分解能光学衛星画像による雲補正と津波被害領域の抽出	広範囲の津波被害に対する抽出手法	・雲補正による改善 ・NDVI 値による被害域の抽出	2.4.
準リアルタイム中分解能 SAR 衛星画像による津波被害領域の抽出	広範囲の津波被害に対する抽出手法	・MTC による判読特性の把握	2.4.

復旧・復興フェーズにおいては、東日本大震災による津波被害について高分解能光学衛星画像群を用いた時系列データセットの構築を行い、高精細な画像情報の特性を活用した沿岸域の復旧・復興の状況をモニタリングすることにより、その効果や有用性を評価した。特に津波により流出などの被害を被った海岸林の変化過程についてマルチスペクトル画像情報を用いて評価した。加えて、周辺インフラとして海岸堤防、復興道路の応急・復旧工事の進捗状況を目視判読により変化過程を調査した。

表 1.6 検討内容に対する課題と目的（復旧・復興フェーズ）

実施内容	課題と目的	課題に対する工夫 (新規性)	説明 箇所
災害前後の 5 時期の高分解能光学衛星画像情報を用いたパンシャープン、正規化植生指標値による判読調査による沿岸域の変化課程の把握	復旧・復興状況を面的且つ継続的に把握する手法の確立	・高分解能衛星画像時系列データセットの構築 ・海岸堤防、復興道路、海岸林の変化過程の把握	3.2 3.3
正規化植生指標値を用いた面的な植栽事業の把握手法の開発	植栽の有無と海岸林の健全状態の把握	・NDVI 値による把握 ・NDVI 値による植栽事業の進捗の把握のための差分	3.4 3.5

これらの検討結果から災害直後フェーズにおいては応急・復旧のための概要調査としての有用性を検討した。また、復旧・復興フェーズにおいては、高分解能衛星画像による時系列データセットが復旧・復興事業の進捗過程を面的且つ定期的、さらに適切な把握手法としての有用性を検討した。これらの検討結果は 4 章にまとめた。

ここで災害直後フェーズとは、早期の復旧・復興に関連する条件整備としての応急対応期間と定義した。具体的に被災状況などの把握や二次災害被害の防止拡大に対する調査期間、さらに、これらの情報を用いた計画的復興への条件整備としての体制・復興方針・復興計画の検討・作成までの期間とした。復旧・復興フェーズとは、災害直後フェーズの以降と定義した。なお、災害の規模において災害直後フェーズの災害情報の収集期間に差異が生じるが、東日本大震災級の大規模災害クラスと位置付けた。そのため、広域における被災状況としての概略調査としての利用方法についても検討を加えた。



## 1.6. 本論分の構成と内容

本論文は、本章を含めて4章から構成される。第1章では、現状の衛星画像の利用状況などを整理するとともに、衛星画像の災害利用に関する既存の研究内容を概観し、本研究の立ち位置を明らかにした。第2章では、まず本研究の方針について概略的に述べた後、災害直後フェーズにおける光学・SAR衛星による浸水域の抽出・精度評価を行うとともに、抽出結果の改善手法について検討した。第3章では、復旧・復興フェーズにおける時系列データセットの構築と被害領域の効果的な把握手法に関して、詳しく述べる。第4章では、本論文で述べている研究の内容とその成果、今後の展望や研究課題について総括した。

### 1.6.1. 災害直後フェーズによる衛星画像を用いた浸水域の抽出

#### (1) 研究対象とした浸水災害

##### a) 平成27年9月関東・東北豪雨

平成27年9月7日に発生した台風第18号や前線の影響で、広い範囲で大雨となった。その後、湿った空気が流れ込み続けた影響で、多数の線状降水帯が次々と発生し、関東地方と東北地方を中心に記録的な大雨となった。特に9月9日から9月10日にかけて、統計期間が10年以上の観測地点のうち16地点で、最大24時間降水量が観測史上1位の値を更新したことが報告されている。人的被害においては全国で死者14名となった。常総市若宮戸地先で溢水、常総市三坂町地先において約200mにわたって堤防が決壊した。この影響で常総市において家屋の流出などが発生し、住宅の全壊53棟、大規模半壊1,578棟、半壊3,476棟、これらに至らない建物の内、床上浸水148棟、床下浸水3,072棟の家屋被害をもたらしたことが報告されている[34]。さらに広域浸水、長期湛水により大規模な復旧・復興作業が必要であった。茨城県常総市における堤防決壊箇所の空中写真を図1.17に、浸水被害を図1.18に示す。特に被害が甚大であった茨城県内では農業や商工業関係、公共土木や教育関係、社会福祉施設などの幅広い産業や設備に被害が発生し、被害総額は約401億円に及んだ。

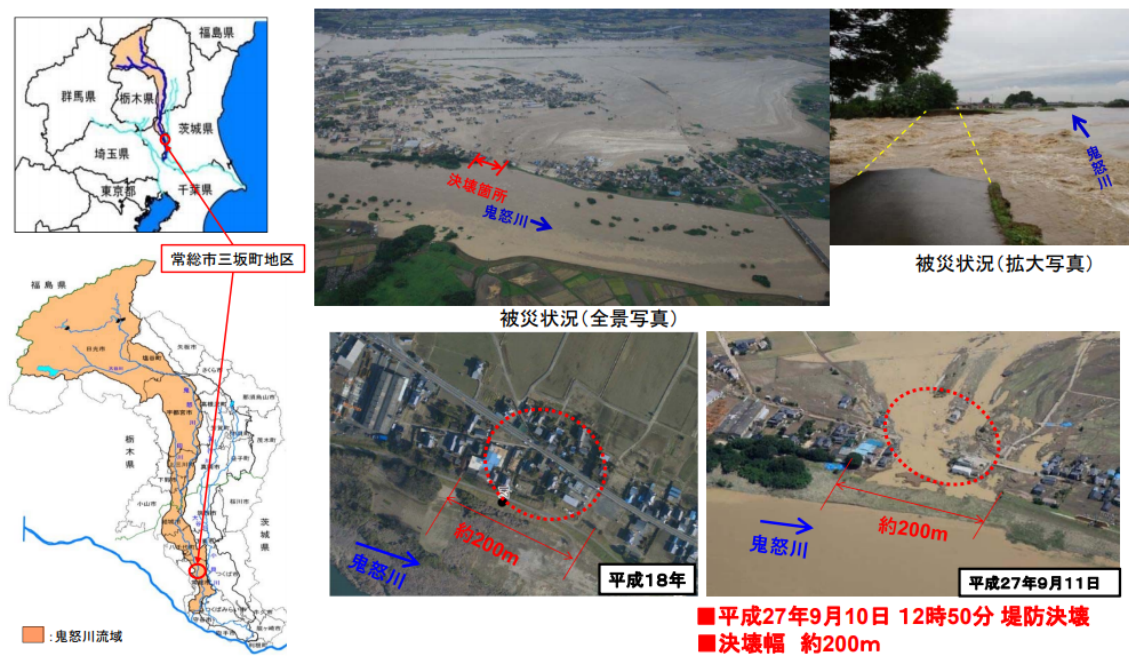


図 1.17 平成 27 年 9 月関東・東北豪雨時の空中写真（茨城県常総市）<sup>[35]</sup>



図 1.18 平成 27 年 9 月関東・東北豪雨時の浸水状況<sup>[35]</sup>

b) 平成 30 年 7 月豪雨

6 月 28 日以降、台風第 7 号と梅雨前線の影響によって 7 月 6 日から 8 日にかけて西日本を中心に広い範囲で記録的な大雨となり、各地で甚大な被害が発生した。気象庁によると、前線や湿った空気の影響で、6 月 28 日から 7 月 8 日午前 9 時までの総降水量が四国地方で 1,800 ミリ、東海地方で 1,200 ミリ、九州北部地方で 900 ミリ、近畿地方で 600 ミリ、中国地方で 500 ミリを超えるところがあるなど、7 月の月降水量の平均の 2~4 倍の大雨を各地で記録した[36]。過去の豪雨と比較すると大雨によって 100 人以上の死者行方不明者が出たのは、1983 年に島根県を中心にがけ崩れ、土石流、洪水が相次いで発生した「昭和 58 年 7 月豪雨」以来で、本災害は平成に入って最悪の死者行方不明者数となった。この豪雨の影響により、広域かつ同時多発的に河川の氾濫、がけ崩れが発生した。また、河川の氾濫により比較的長時間の浸水被害が発生し、家屋浸水が 30,000 棟の極めて甚大な被害が発生した。

特に岡山県倉敷市真備町の高梁川水系小田川においては、7 月 7 日に川の増水によって堤防が決壊し、国土地理院によると浸水深さ 5m 程度の浸水範囲が広範囲に広がったと報告されている。図 1.19 に空中写真、図 1.20 に浸水範囲を示す。倉敷市真備町の浸水箇所については、7 月 8 日 8 時半より、警察、消防、自衛隊、岡山県と調整を実施し、国土交通省 TEC-FORCE による 3 か所に計 33 台による排水ポンプ車による排水作業が行われ、7 月 11 日には宅地・生活道路については概ね浸水被害は解消された。また、主な堤防決壊箇所である小田川左岸 3k 400 地点及び 6k 400 地点の緊急復旧工事は 21 日に完了したことが報告されている。2018 年 8 月 27 日時点での現地調査写真を図 1.21、図 1.22 に示す。



図 1.19 平成 30 年 7 月豪雨時の空中写真（岡山県倉敷市真備町） [37]



図 1.20 平成 30 年 7 月の浸水範囲（岡山県倉敷市真備町） [37]



撮影日:2018年8月26日

図 1.21 浸水域の状況



撮影日:2018年8月26日

図 1.22 浸水被害を受けた家屋

c) アナク・クラカタウ火山噴火による津波被害

2018年12月22日にインドネシア西部のスンダ海峡に発生した津波で、スマトラ島やジャワ島などの沿岸域に甚大な被害が発生した。この津波はアナク・クラカタウ島の火山活動に起因した山体崩壊により発生した津波の影響であったことがその後の調査でわかった[38,39]。火山噴火後の空中写真を図1.23に示す。このような火山島の山体崩壊による津波被害は過去に日本でも発生している。1700年代には長崎市島原市の眉山、北海道松前町の渡島大島で山体崩壊により津波が発生し、周辺の沿岸域に多くの損害を与えた[40,41]。近年、国内においては気象庁火山噴火予知連絡会衛星解析グループによる衛星を用いた火山監視が行われている[42]。山体崩壊で生じた土砂が海域に流入することにより発生した津波は、陸域までの到達時間が短く、周辺住民への避難勧告が難しいとされる。加えて、地震による津波と比較して強い津波が発生するため周辺沿の岸域への被害が大きくなりやすいとされる。このような山体崩壊に伴う津波は、周辺沿岸域への被害範囲が広域となる可能性が高い。図1.24に津波が襲来した様子を示す。そのため、災害直後フェーズにおいて広域を効果的に把握できる観測ツールの開発・運用が急務である。また、このような災害直後フェーズにおける被害の概略調査として発生要因や被害状況を把握することは行政の災害対応を決定する上で極めて重要である。調査対象範囲の沿岸部は森林による被覆が多いが、小規模な住宅密集地も点在する地域である。また、インドネシアには火山が多く火山活動の大小はあるものの、約130もの火山を有している。



図 1.23 アナク・クラカタウの火山噴火<sup>[38]</sup>



図 1.24 津波の襲来<sup>[38]</sup>

## (2) 検討方法

災害直後フェーズにおいては、浸水域の抽出精度の向上に向けた高度化手法について研究を進める。これは洪水災害時には、浸水被害の全容を把握することが、災害対応を立案する上で最も重要であるからである。そのため、光学・SAR 衛星画像を用いて従来、一般的に用いられてきている浸水域の抽出手法を適用し、その抽出特性を整理後に改善手法を提案した。政府指定行政機関が公表する浸水域を参照データとして、従来手法と改善手法の精度評価を行った。精度評価は、抽出率（空中写真の目視判読における浸水域の内、衛星画像から抽出できた浸水域の割合）と正当率（衛星画像抽出で浸水域と判定した箇所が目視判読による浸水域であることを示す割合）により評価した。さらに、未抽出領域や過剰抽出領域を整理し、改善手法の適用範囲を考察に加えた。

### a) 平成 27 年 9 月関東・東北豪雨

対象範囲は平成 27 年 9 月関東・東北豪雨により浸水被害を含む茨城県常総市を対象とした。調査対象範囲を図 1.25 に示す。災害前後の光学衛星画像によるマルチスペクトル画像情報と地理空間情報を併用した浸水域把握技術の検討のための調査・解析フローを図 1.26 に示す。平成 27 年 9 月関東・東北豪雨における浸水域の抽出の検討においては、災害前後の光学衛星画像を用いて差分解析により、浸水域の抽出を行う。前処理且つ浸水域のスペクトル把握を行った上で閾値の設定により、得られた浸水域の精度評価を行った上で精度向上のための GIS 処理を行い、手法の適用性を把握した。

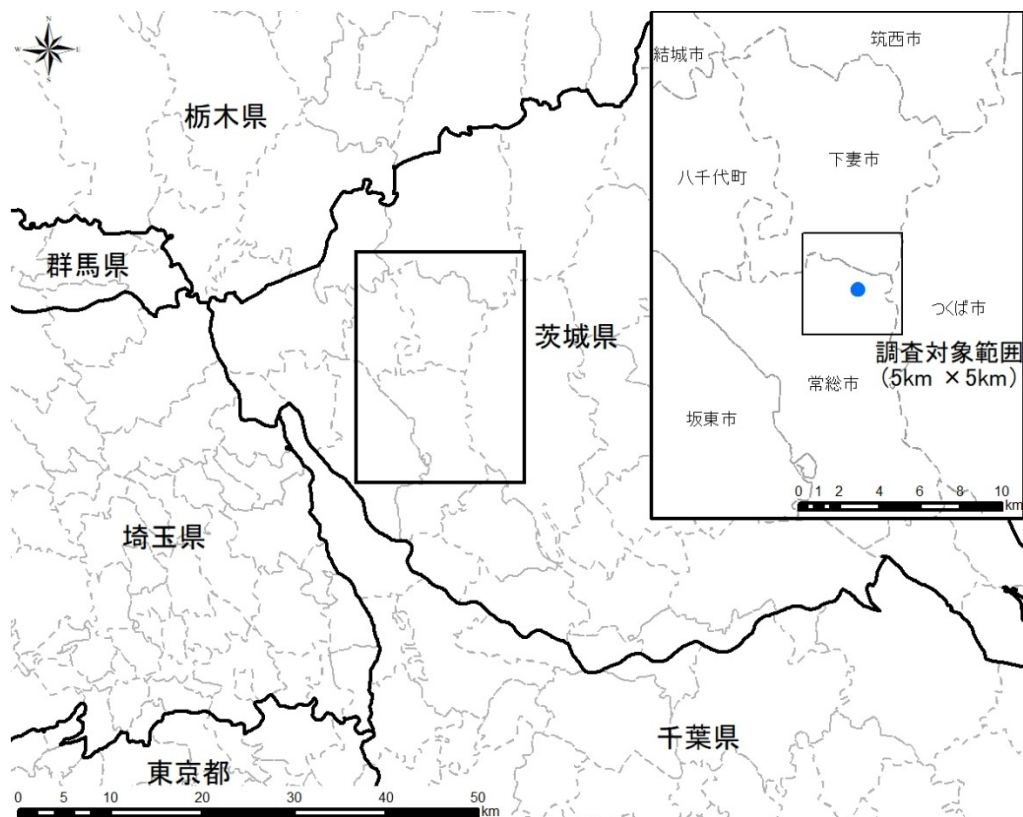


図 1.25 調査対象範囲



調査・解析フロー

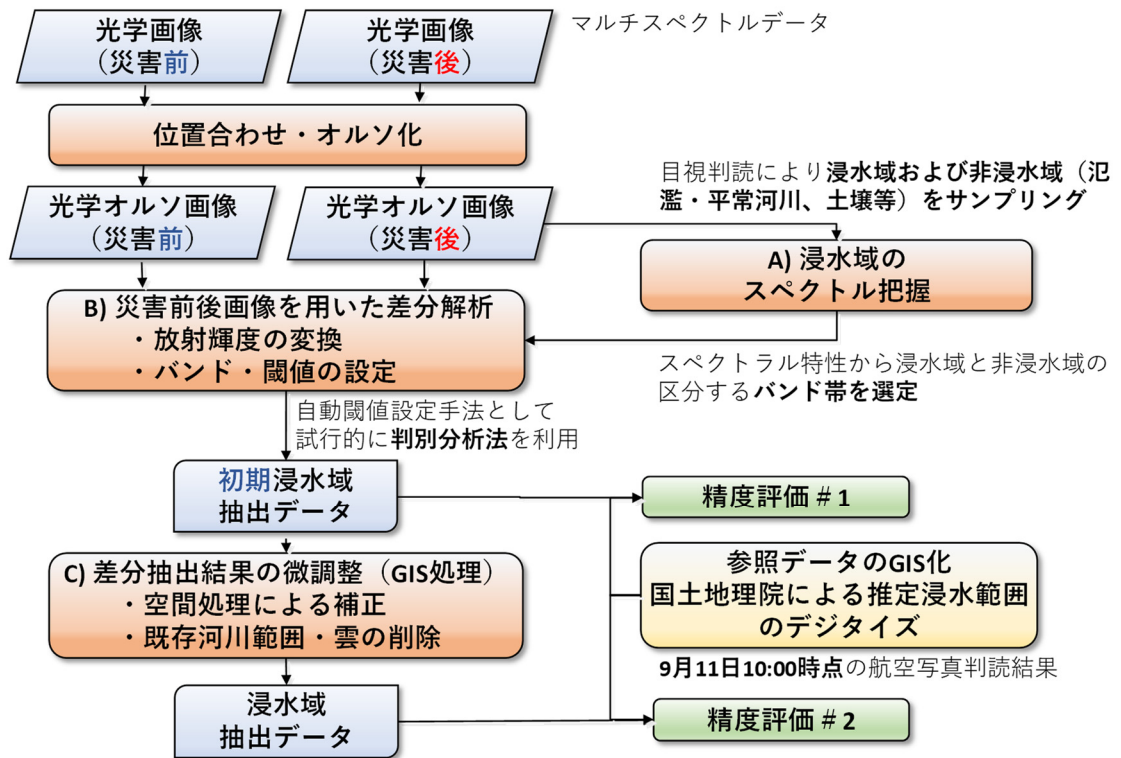


図 1.26 調査解析フロー

(災害前後の光学衛星画像と地理空間情報を併用した浸水域把握技術の検討)

b) 平成 30 年 7 月豪雨

対象範囲は平成 30 年 7 月豪雨の浸水被害を含む岡山県倉敷市真備町を対象とした。調査対象範囲を図 1.27 に示す。なお、ここでは光学および SAR 衛星画像のそれぞれで浸水域の抽出手法を検討するが、調査対象範囲は同様とした。

光学衛星画像による浸水域の抽出手法の検討として、災害後のみの光学衛星画像によるマルチスペクトル画像情報と地理空間情報を併用した浸水域把握技術の検討のための調査・解析フローを図 1.28 に示す。令和 2 年度に先進光学衛星が打ち上げ予定であるが、運用初期は観測データ（アーカイブ）が乏しく、災害後の観測画像と比較となる平時の画像がなく従来の災害前後の差分による浸水域の抽出は困難となる課題がある。

そこで平成 30 年 7 月豪雨における浸水域の抽出の検討においては、災害後のみの光学衛星画像を用いて GSI 値（Grain size index）を用いることで浸水域の抽出を行った。閾値の設定により、得られた浸水域の精度評価を行った上で精度向上のための GIS 処理および街区ポリゴン、建物ポリゴンの地理空間情報を併用した改善手法を提案し、精度評価を適切に行うことにより、改善手法の適用性を把握した。

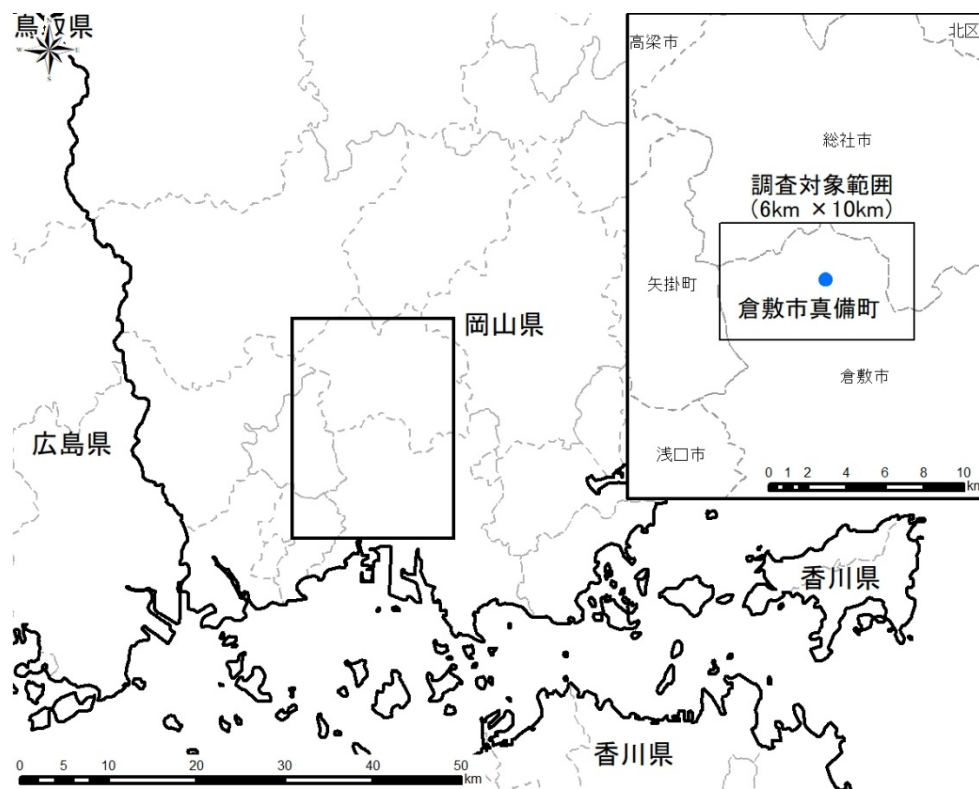


図 1.27 調査対象範囲

調査・解析フロー

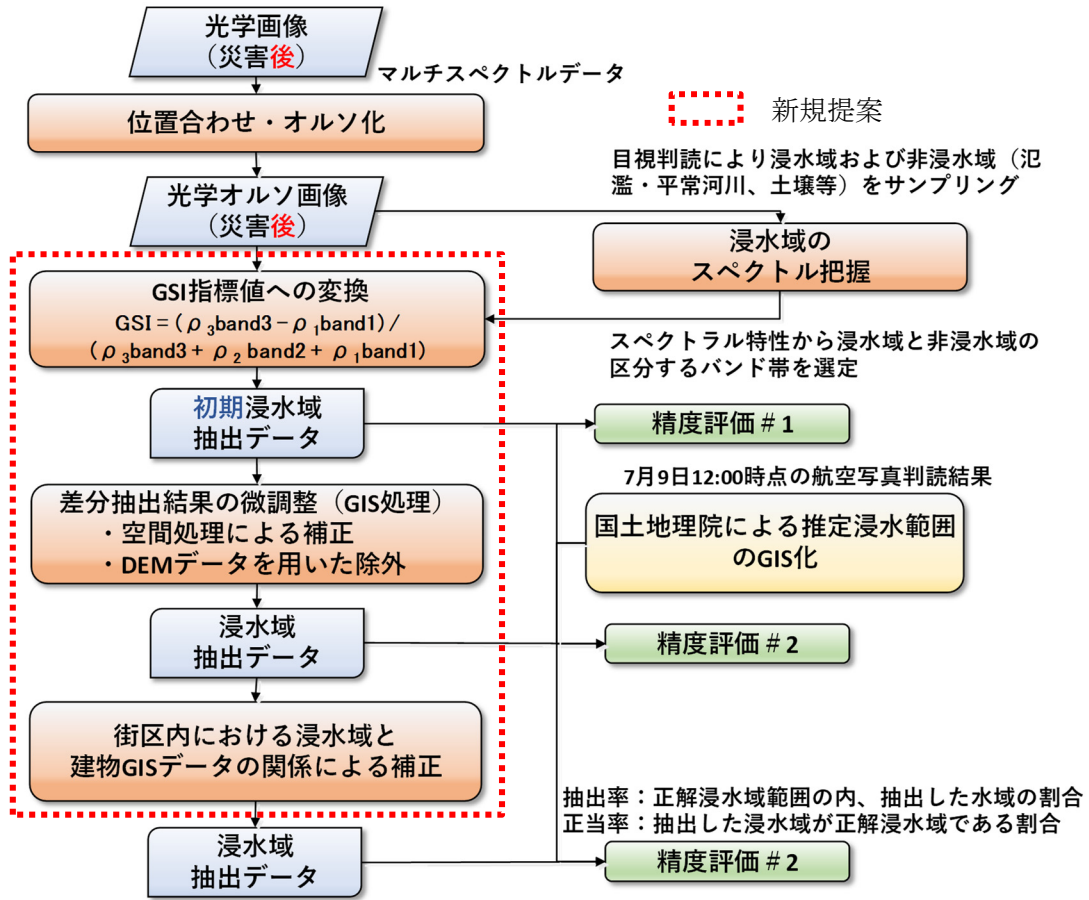


図 1.28 調査解析フロー

(災害後のみの光学衛星画像と地理空間情報を併用した浸水域把握技術の検討)

平成 30 年 7 月豪雨を対象とした災害前後の SAR 衛星画像の振幅および位相情報と地理空間情報を併用した浸水域把握技術の検討のための調査・解析フローを図 1.29 に示す. 災害前後の SAR 衛星画像を用いる場合, 季節差やノイズによる誤抽出・抽出漏れがあることや, 前述の手法で利用した街区ポリゴンの有無が課題と認識し, 災害前後に観測された SAR 衛星画像と地理空間情報を組み合わせて, 浸水域の抽出精度の向上を図った. また, 干渉 SAR 解析結果により得られるコヒーレンス値を併せて利用することで浸水建物を判別することでさらなる浸水域の精度の向上を検討した.

### 調査・解析フロー

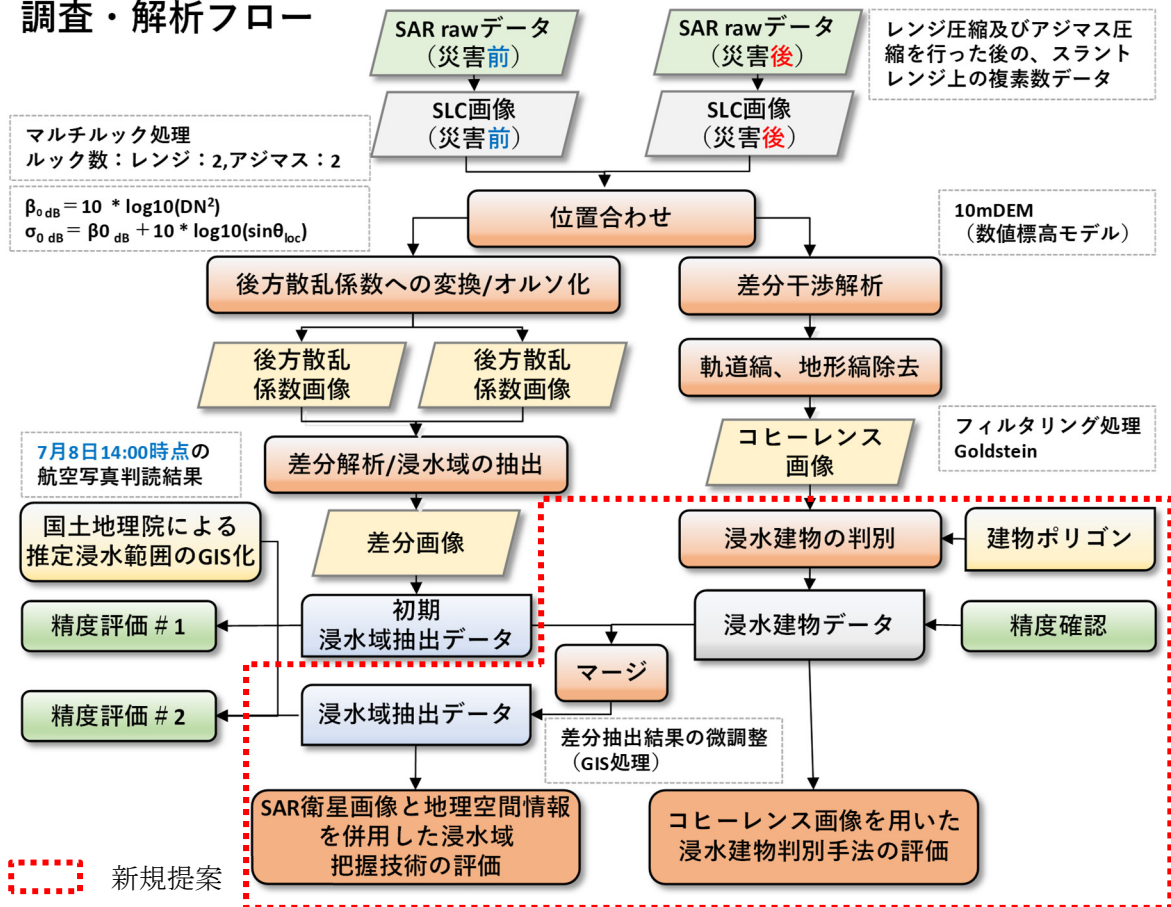


図 1.29 調査解析フロー

(SAR 衛星画像と地理空間情報を併用した浸水域把握技術の検討)

c) クラカタウ火山噴火による津波被害

対象範囲はクラカタウ火山の火山活動により津波被害を受けたジャワ島の沿岸域とした。調査対象範囲を図 1.30 に示す。光学衛星画像を用いた津波被害領域の抽出における調査・解析フローを図 1.31 に示す。平成 30 年 12 月 12 日にインドネシア西部のスンダ海峽に位置するAnak・クラカタウ火山の山体崩壊に起因する津波によって被災した被害域の抽出を行う。前処理且つ品質評価データを用いた雲補正を行った上でNDVI 値を算出し、条件式の設定することで津波被害域を抽出した。また、得られた被害域と参照データを比較することで精度評価を行った。ここで NDVI 値を用いた理由として、被災した周辺沿岸域の代表的な被覆は森林であったことから災害前後の NDVI 値の増減で抽出が期待できるからである。また、精度向上のための GIS 処理を行い、手法の適用性を把握した。

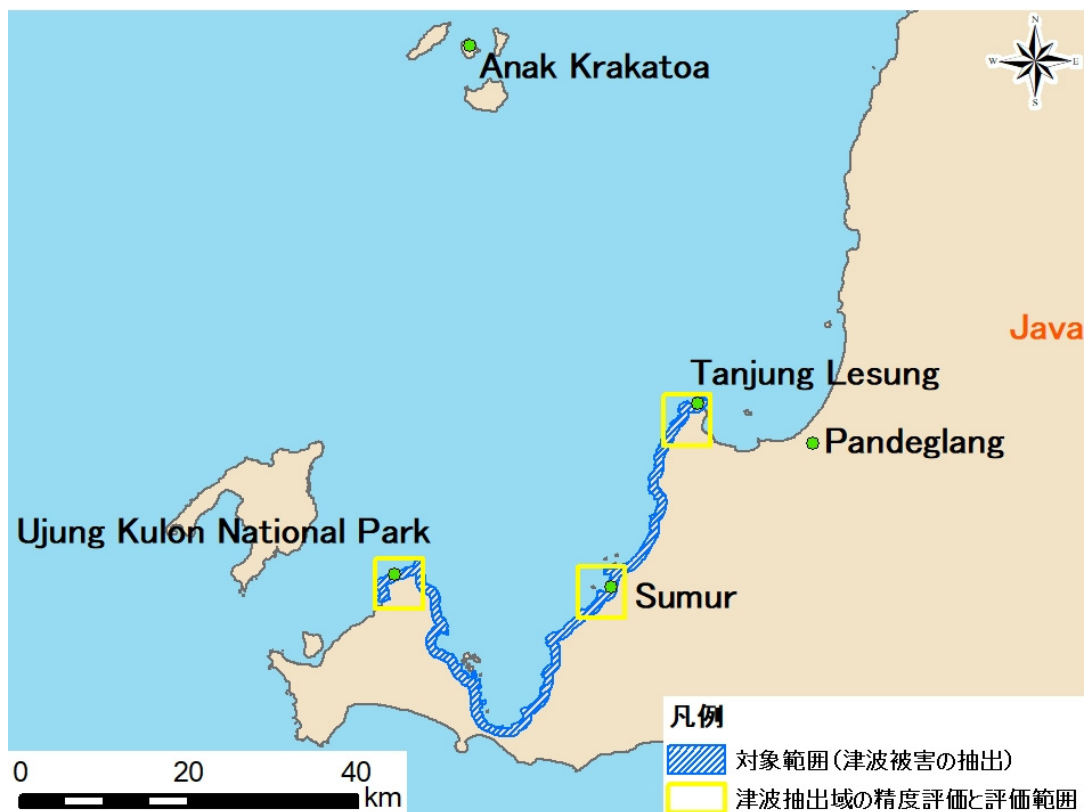


図 1.30 調査対象範囲

調査・解析フロー

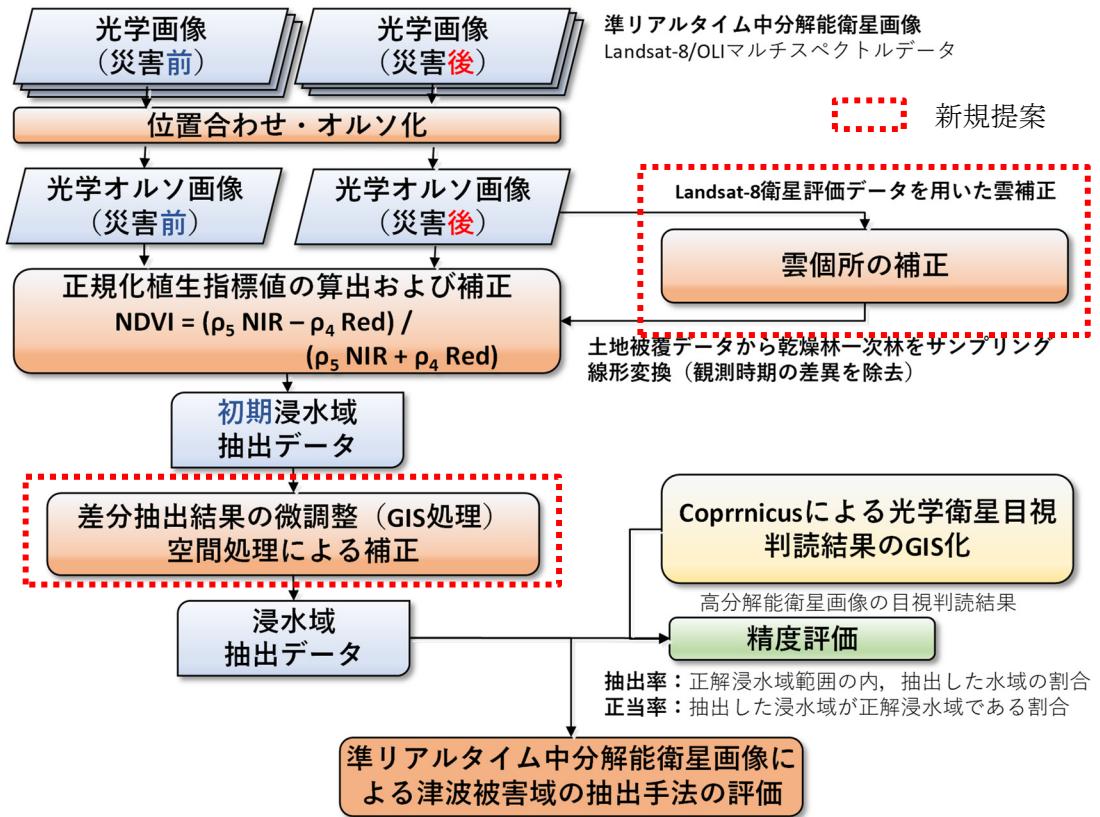


図 1.31 調査解析フロー

(準リアルタイム光学衛星画像による雲補正画像を利用した被害領域把握技術の検討)

SAR 衛星画像を用いた津波被害領域の抽出における調査・解析フローを図 1.32 に示す。ここでは MTC(Multi Temporal Coherence)手法による被害域の判読を検討した。また、従来溶岩流の調査に用いられることが多い SAR の振幅情報と干渉解析結果から得られる強度情報と干渉解析結果から得られる 2 時期の干渉度を示すコヒーレンス情報を併せた MTC(Multi Temporal Coherence)手法だが、津波被害域に適用した事例はない。加えて、Sentinel-1 および Sentinel-2 衛星はそれぞれ 2 機体制(2019 年 1 月時点)で観測するため、Landsat-8 衛星の観測も含めれば、即応フェーズでの被害の概要調査や復旧・復興フェーズでの定期的且つ時系列な調査が可能であり、防災分野の利用に期待できる。そこで本研究では、観測後に準リアルタイムでフリーに入手が可能な災害前後の光学・SAR の衛星画像による観測データを用いてアナク・クラカタウ島の山体崩壊の判読調査と周辺沿岸域の津波被害領域の抽出について検討した。

### 調査・解析フロー

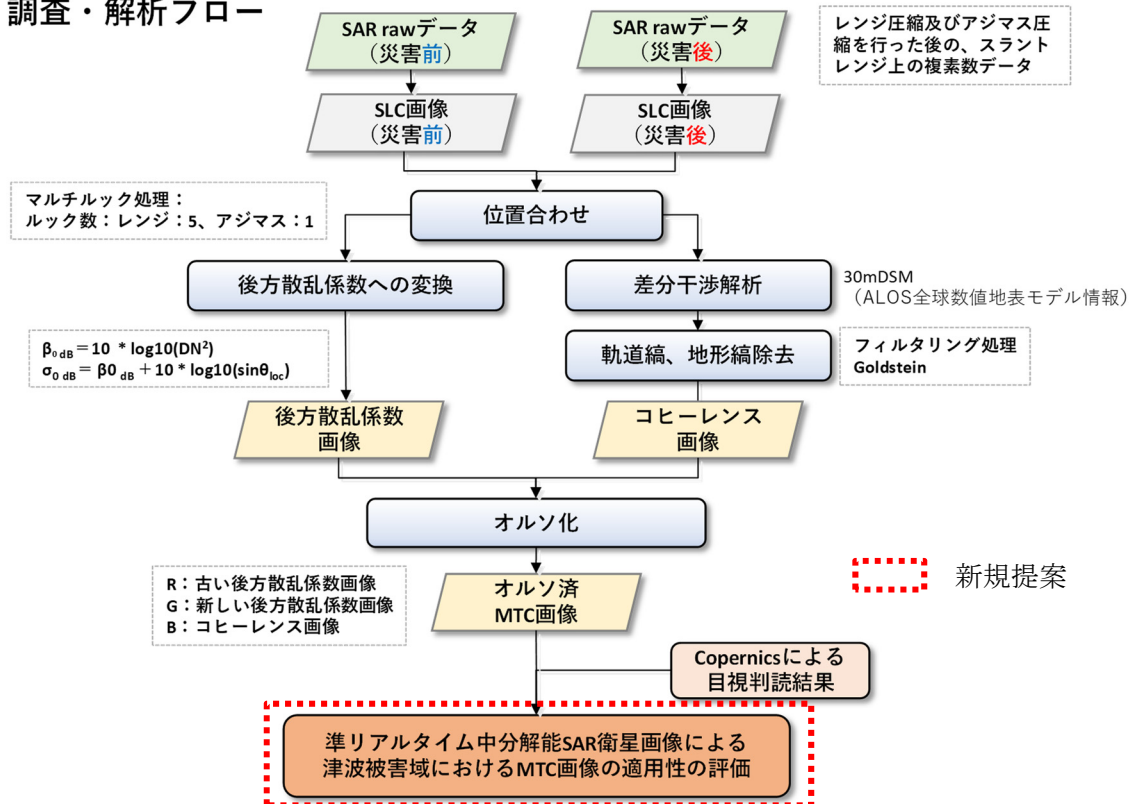


図 1.32 調査解析フロー

(準リアルタイム SAR 衛星画像による MTC 画像の適用性の検討)

## 1.6.2. 復旧・復興フェーズによる衛星画像を用いた浸水域の抽出

### (1) 研究対象とした浸水災害と復旧・復興事業

#### a) 東日本大震災

平成 23 年 3 月 11 日 14 時 46 分、牡鹿半島（宮城県石巻市）の東南東約 130km の三陸沖深さ約 24km の地点を震源とするマグニチュード (M) 9.0 の「平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震」が発生した。本地震における各地震度を図 1.33 に、この地震を起因とする沿岸の津波高を図 1.34 に示す。最も激しい揺れを記録した宮城県栗原市で震度 7、宮城県、福島県、茨城県、栃木県で震度 6 強の揺れが観測された。国土地理院によると、この地震により生じた地殻変動によって、牡鹿半島の電子基準点は水平方向に東南東へ約 5.3m 移動し、垂直方向には約 1.2m 沈下したことが報告されている。また、海上保安庁によると、震源のほぼ真上に位置する海底基準点は東南東に約 24m 移動、約 3m 隆起した。地震及び津波による死者・行方不明者及び負傷者は、平成 23 年 6 月 30 日時点でそれぞれ 15,511 名、7,189 名、5,388 名であり、阪神・淡路大震災での人的被害（死者 6,434 名、負傷者 41,500 名）をはるかにしのぐ。建物被害は全壊・半壊・一部損壊合計で 620,802 戸、全焼又は半焼 256 戸にも及ぶ大災害となった。

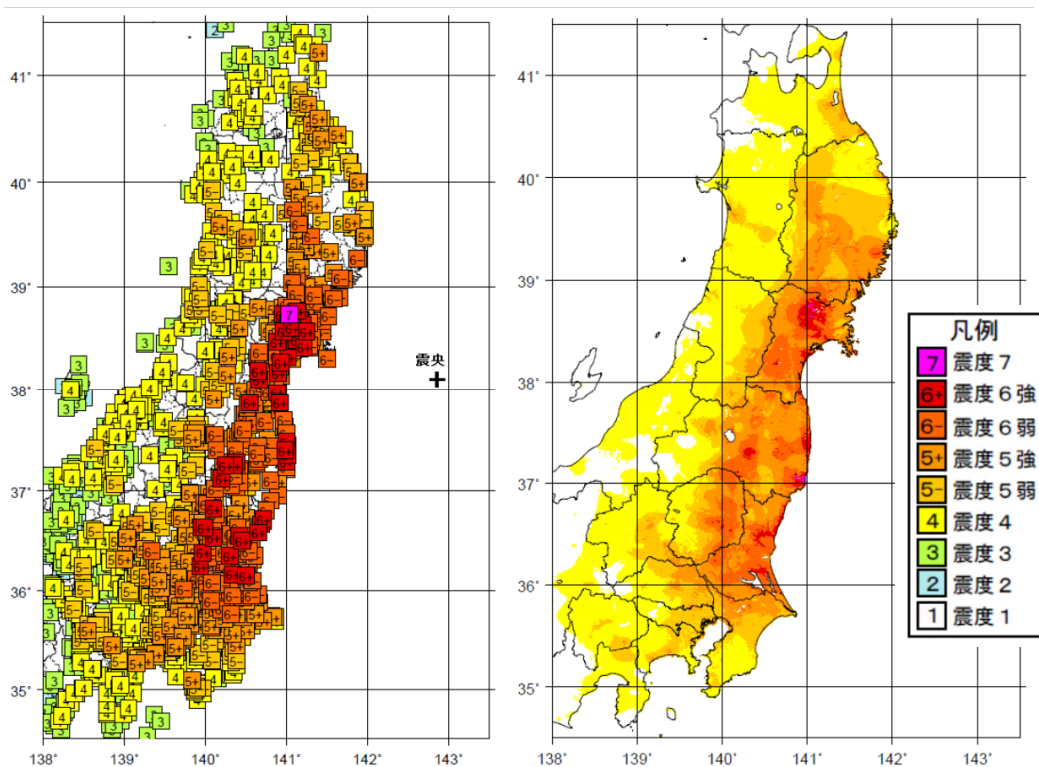


図 1.33 東日本大震災における各地の震度分布<sup>[43]</sup>



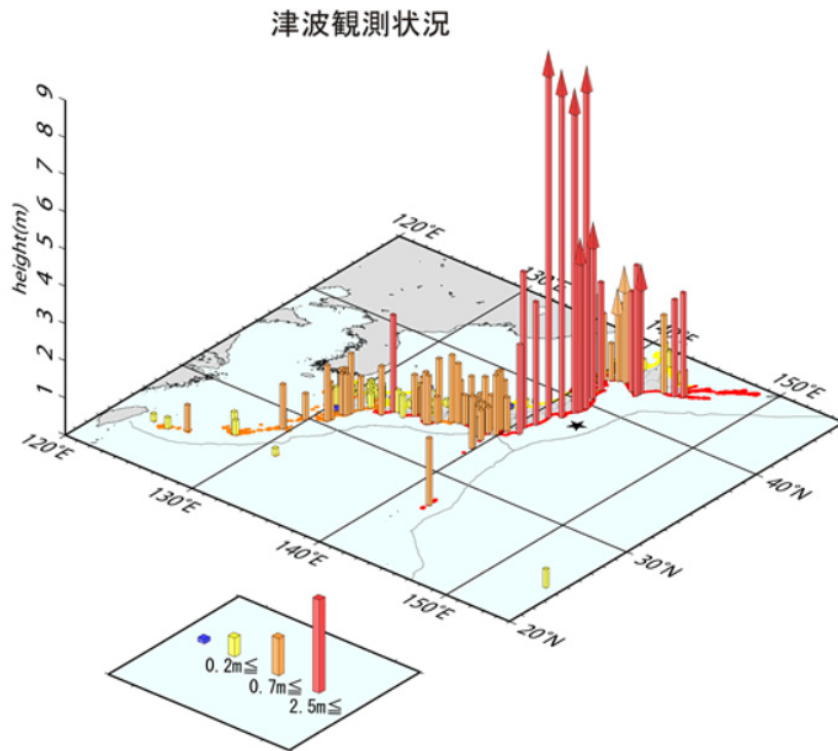


図 1.34 東日本大震災における津波観測状況<sup>[44]</sup>

b) 仙台平野沿岸域における復旧・復興事業

仙台湾における浸水被害領域を図 1.35 に示す. 2011 年 3 月に発生した東日本大震災による津波によって, 仙台湾南部海岸の海岸保全施設は堤防ブロックの飛散, 堤防裏法面の流出, 背後地盤の洗堀などの甚大な被害を受けた(図 1.36 参照) [45,46]. 加えて国有林および民有林で構成されるクロマツなどの海岸林は倒木, 流出などの被害や立ち枯れにより減少した(図 1.37 参照) [47,48]. これまでに, 被災状況の緊急広域調査や, 被災直後の現地調査を連携させた衛星リモートセンシングや航空機空中写真調査による調査が多く実施されている[49,50,51]. 現在, 津波被害の復旧や沿岸域一体となった多重防御による減災機能の強化を目的に, 関連省庁や自治体による海岸保全施設や海岸林の復旧工事, 沿岸域沿いにかさ上げ道路として復興道路整備事業が進められている[52]. 内閣府による「復旧・復興ハンドブック」の被災状況などの把握の施策によると, 復旧・復興の状況を継続的に把握し, タイムリーな施策を実施する必要があると記載されている. このようなことから, 東日本大震災のような広域におよぶ沿岸域の被害においては, 復旧・復興事業の進捗状況を定期的に適切に把握することが必要であると考えられる[53]. 仙台市の震災復興計画において, 海岸堤防・防災林の復旧・県道かさ上げなどによる「多重防御による減災」と「避難のための施設の確保」, 「安全な内陸への移転」により津波防災を図ると記載されている(図 1.38, 図 1.39 参照). 海岸堤防復旧工事においては, 出水期を迎える前に緊急復旧を行い, 復興計画と整合を図り, 海岸の計画堤防を整備する本復旧を実施している. 復興道路として, かさ上げ道路の東部復興道路整備事業が進められている. 海岸林の再生・復旧事業として防波堤により防災機能を確保しつつ, 必要に応じて生育基盤となる盛土を実施し, 津波に対し根返ししにくい健全な海岸防災林の再生を目指しており, 復旧

が完了した個所から順次、植樹に着手している。

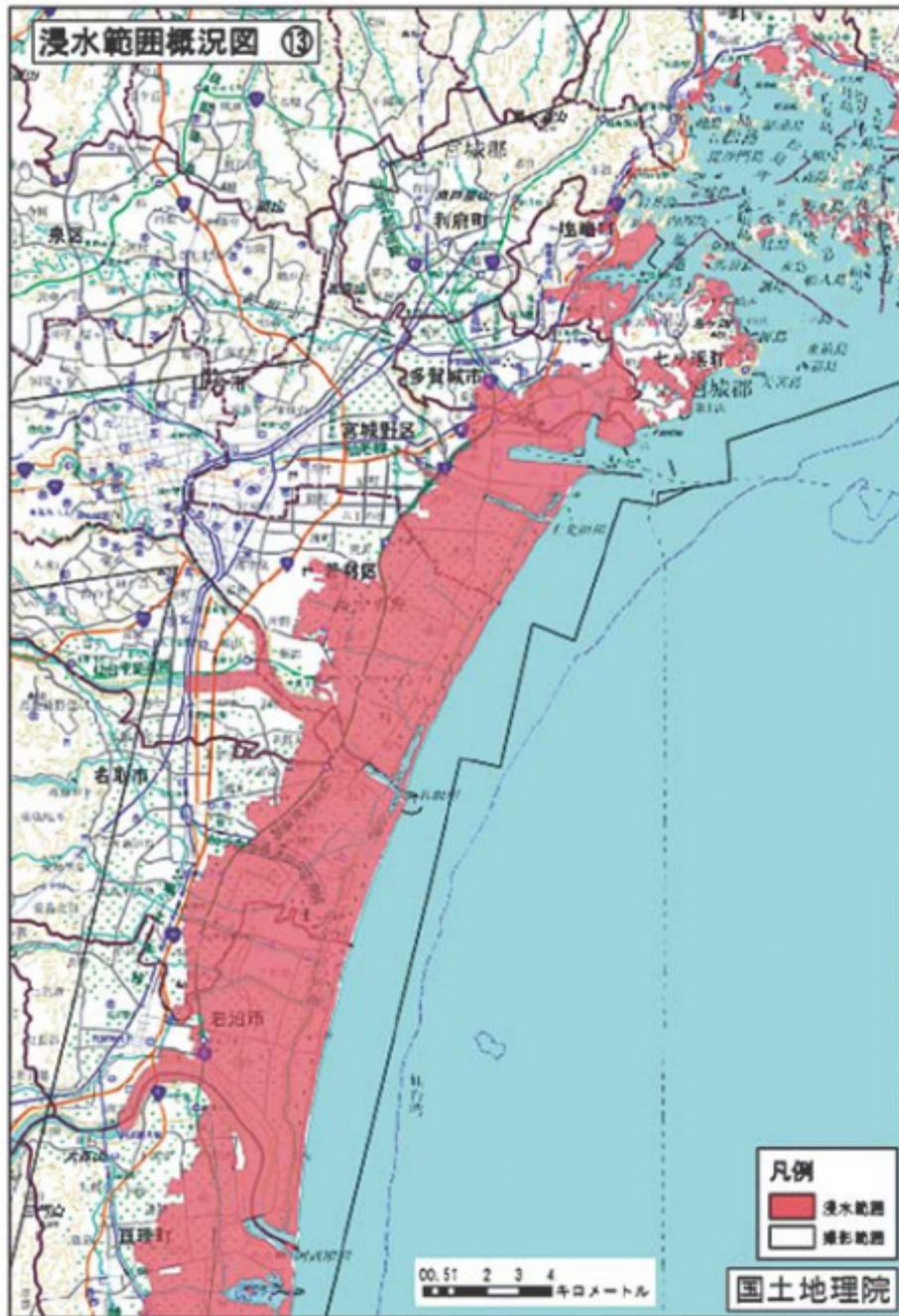


図 1.35 仙台湾における浸水状況<sup>[54]</sup>



図 1.36 津波による海岸堤防への影響<sup>[55]</sup>



図 1.37 津波による海岸林への影響<sup>[56]</sup>

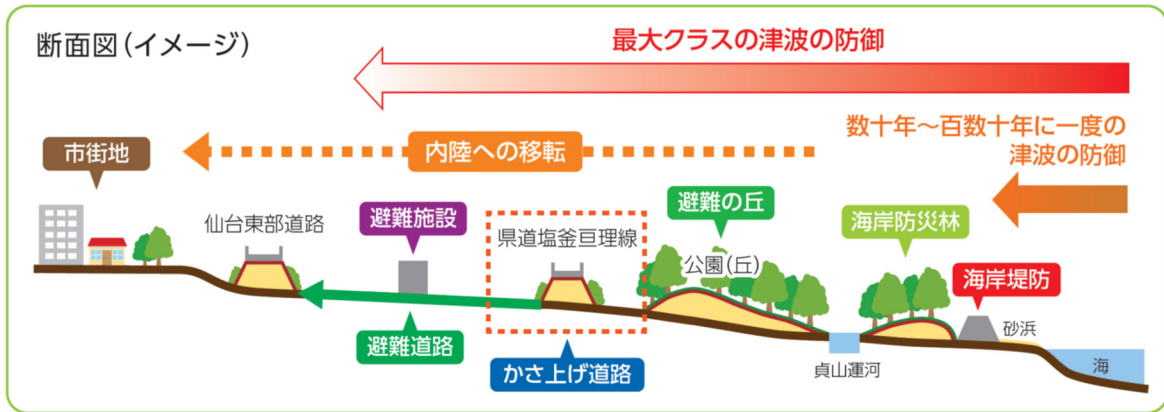


図 1.38 津波対策施設イメージ (断面図) [57]

平面図

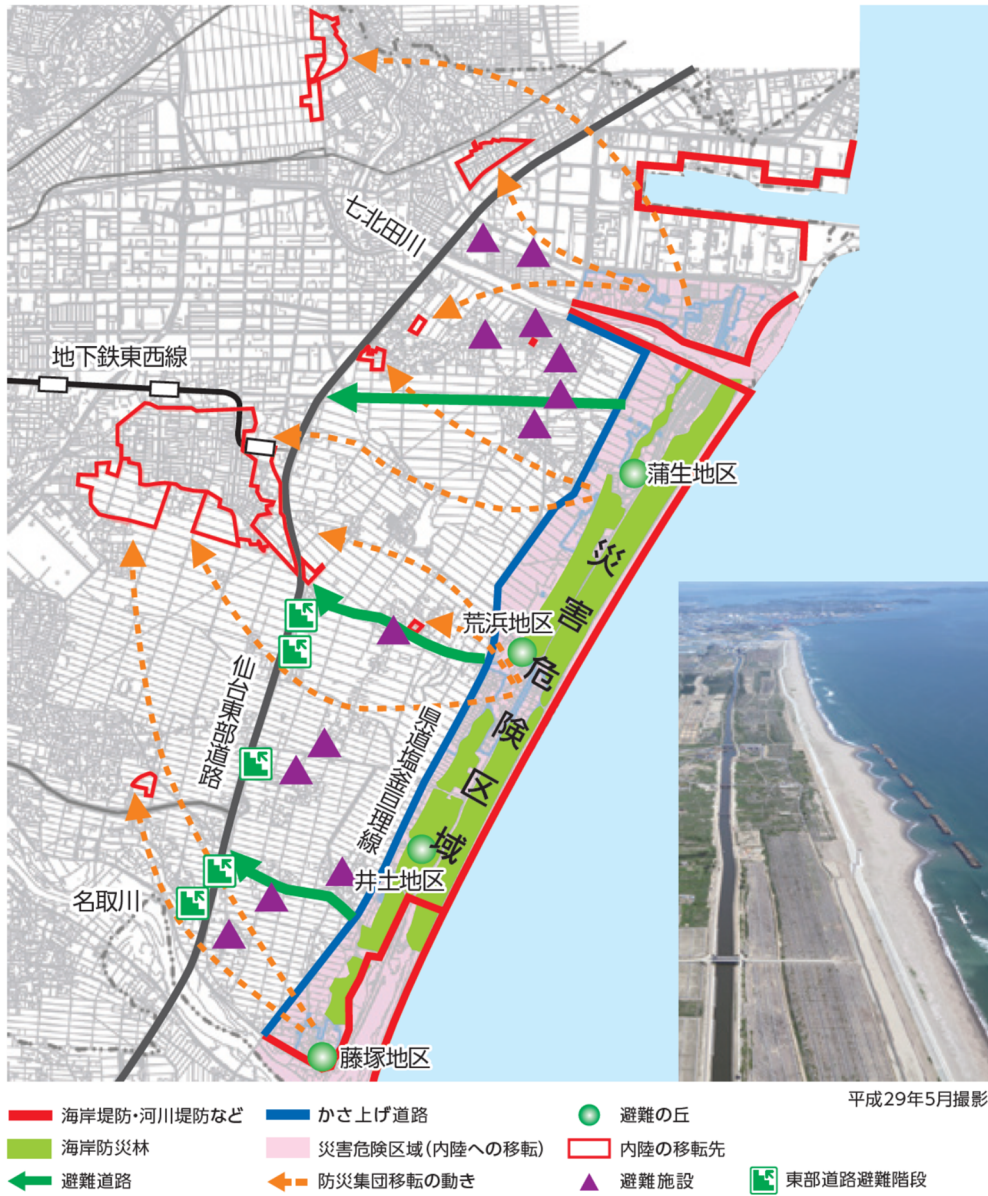


図 1.39 津波対策施設イメージ (平面図) [57]

## (2) 検討方法

本研究における研究対象範囲を図 1.40 に示す。東日本大震災を対象とした複数の光学衛星画像を用いた時系列データセットによる津波被害を対象とした復旧・復興フェーズのモニタリング手法の検討のための調査・解析フローを図 1.41 に示す。長期的・継続的にかつ高詳細に長期復旧過程のモニタリングがされている事例は無い。加えて、東日本大震災のような大規模災害においては、長期におよぶ復旧工程の初期課程の詳細なモニタリングを評価することが、その後の復旧期間の短縮や復旧計画の再調整などの効率化に大きく寄与することが考えられる。また、画像判読調査などによる定性的な調査では得られない衛星観測による分光画像情報の高度画像処理から得られる復旧に係る植生環境を含めた地表面の全体的な被覆環境の変動特性分析手法は十分に検討されていない。さらに、仙台海岸沿岸域の海岸堤防の復旧および復興道路の整備状況を高分解能衛星画像の高詳細な特性を生かして調査した事例は少ない。そこで本研究では、時系列かつ高詳細な調査に優れた特性を有する同季節に観測された 5 時期の高分解能衛星画像の特性を有する分光特性利用した正規化植生指標値の変化過程により、被災地の植樹環境の変化、および植樹事業進捗に伴う沿岸域の土地被覆特性の変化過程を評価した。加えて、仙台海岸沿岸域の海岸堤防の復旧状況と復興道路の整備進捗状況および海岸林の復旧過程を画像判読により調査した。

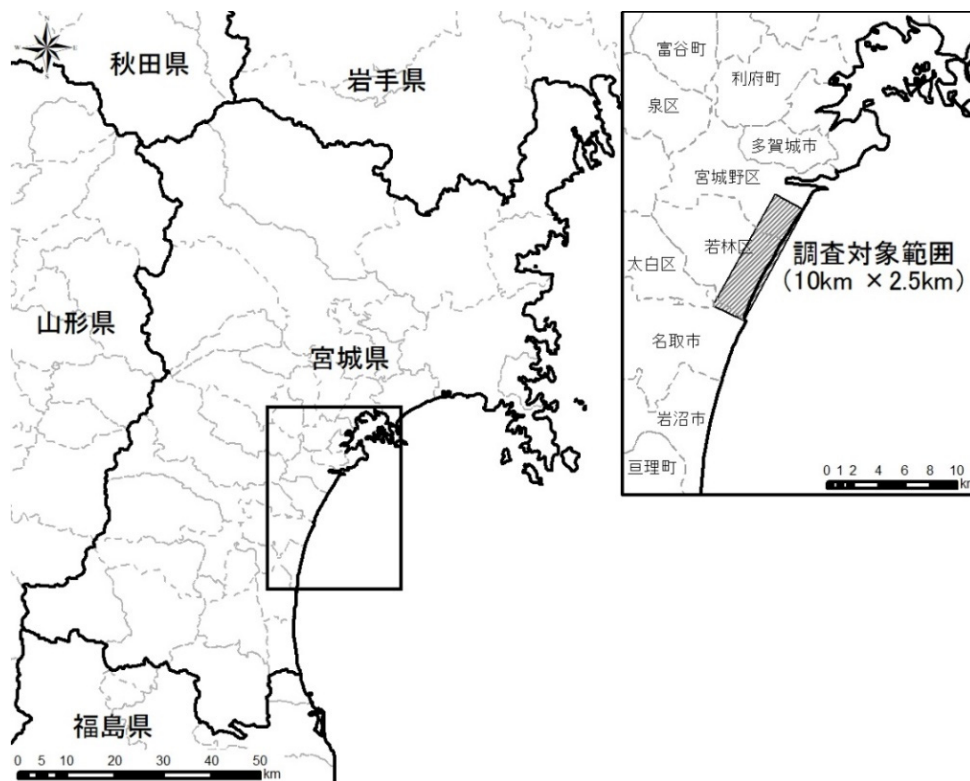


図 1.40 調査対象範囲

調査・解析フロー

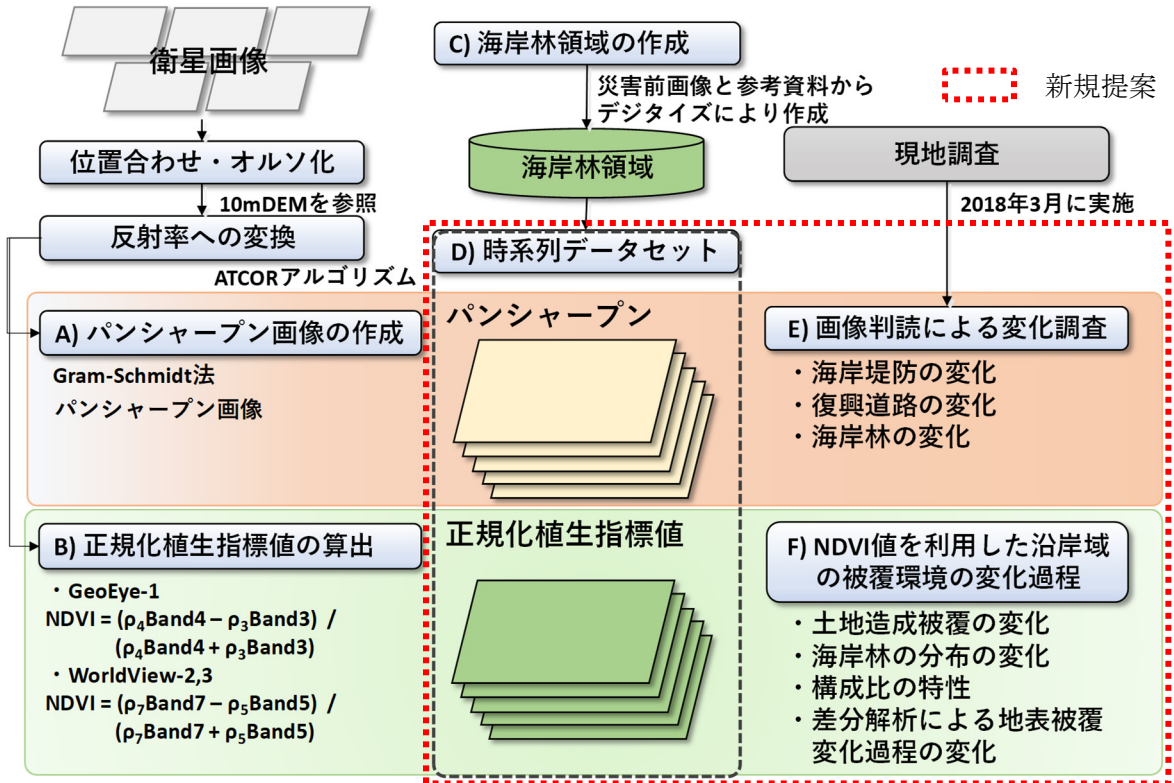


図 1.41 調査解析フロー  
(時系列データセットによる津波被害を対象とした復旧・復興フェーズの  
モニタリング手法の検討)

## 2. 災害直後フェーズにおける浸水域の抽出の検討

### 2.1. 研究概要

現状の浸水域における衛星画像を用いた浸水域の抽出は、衛星画像のみの抽出がほとんどであり、空間情報あるいは異種衛星との併用による災害直後フェーズでの手法の検討には至っていない。そこで本章では災害直後フェーズの衛星画像による浸水域の抽出手法の高度化と異種衛星による併用手法の開発を目的とした。また、災害対応を担う政府・地方自治体の意思決定への寄与を目標とした。

#### 2.1.1. 光学画像データの NDWI 指標を用いた単画像による浸水域の抽出

本項では、従来から水域を抽出するために一般的に用いられている NDWI (Normalized Difference Water Index) 指標値[58]を用いて水域の抽出を行った。災害後に観測された光学衛星画像を用いて地表面における水の存在と深い関連を持つ指標の1つで赤波長 (Red) と中間赤外波長 (SWIR : Short Wave Infrared Radiometer) を用いた NDWI 指標値を用いて抽出状況を確認する。NDWI 値は (4) に示す式で算出される。

$$NDWI = ( \rho_4 \text{ Red} - \rho_6 \text{ SWIR} ) / ( \rho_4 \text{ Red} + \rho_6 \text{ SWIR} ) \quad (4)$$

$\rho_n$ : n バンドの反射率

Red は可視光赤波長帯域、SWIR は中間赤外波長帯域の観測バンドを示す。Landsat-8 衛星画像の場合、SWIR は band6、Red は band4 を指す。NDWI 値は -1 から 1 の値をとり、値が高いときは表面が湛水状況にあると判断される。光学衛星画像は Landsat-8 衛星の OLI センサで取得された画像であり、分解能は 30m 程度を有する。Landsat-8/OLI 画像から作成した NDWI 画像を図 2.1 に示す。Landsat-8 衛星画像データセットに含まれる品質評価画像から雲あるいは影個所を特定し、白く表示している。図 2.1 からわかるように浸水域においては青く表示されており、値が高いことから NDWI 値は水域に卓越していることがわかる。一方、高分解能衛星画像においては中間赤外波長を観測していない衛星画像が多いため、NDWI 値による浸水域の抽出が期待できないケースが多いことが課題である。そのため、光学センサーへの搭載が多い可視光域や近赤外域の波長帯を用いた浸水域の抽出の検討が必要である。

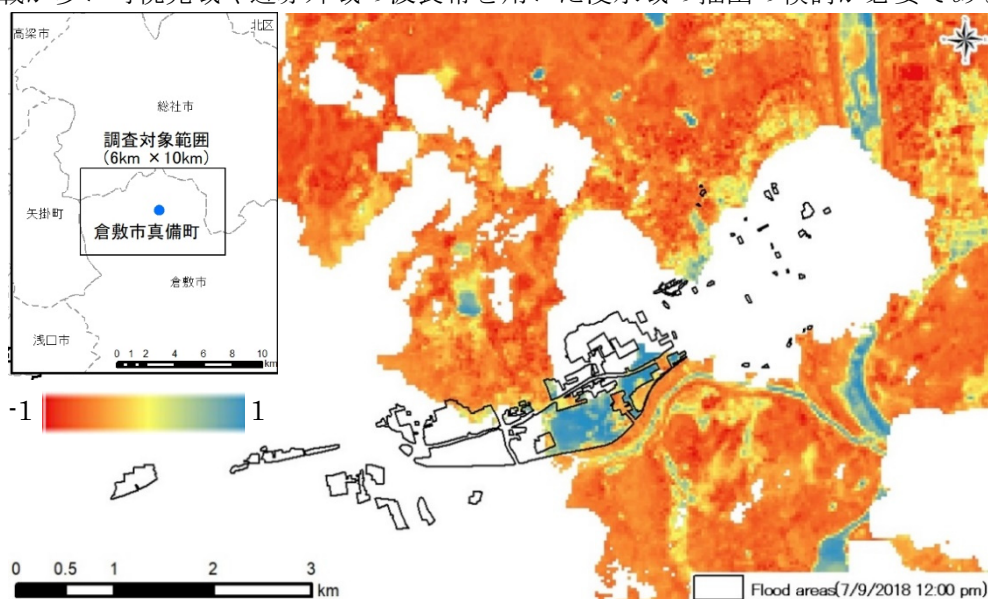


図 2.1 災害後の NDWI 画像 (2018/7/9)

### 2.1.2. SAR データの単画像による浸水域の抽出

本項では、SAR 衛星画像による浸水域の抽出手法として簡易的且つ定常的に利用されている災害後に観測された SAR 衛星画像を用いて浸水域の抽出を試みた。使用した災害後の SAR 衛星画像から後方散乱係数に変換した画像を図 2.2 に示す。浸水域抽出結果を図 2.3 に示す。浸水域の抽出方法としては対象範囲の後方散乱係数の画素値を集計し、閾値を設けることで浸水域を抽出した。一般に水面はフラットな面となるため、浸水域の場合、ラフネスが高くなる傾向となり、浸水域は後方散乱係数が低下する可能性が高い。

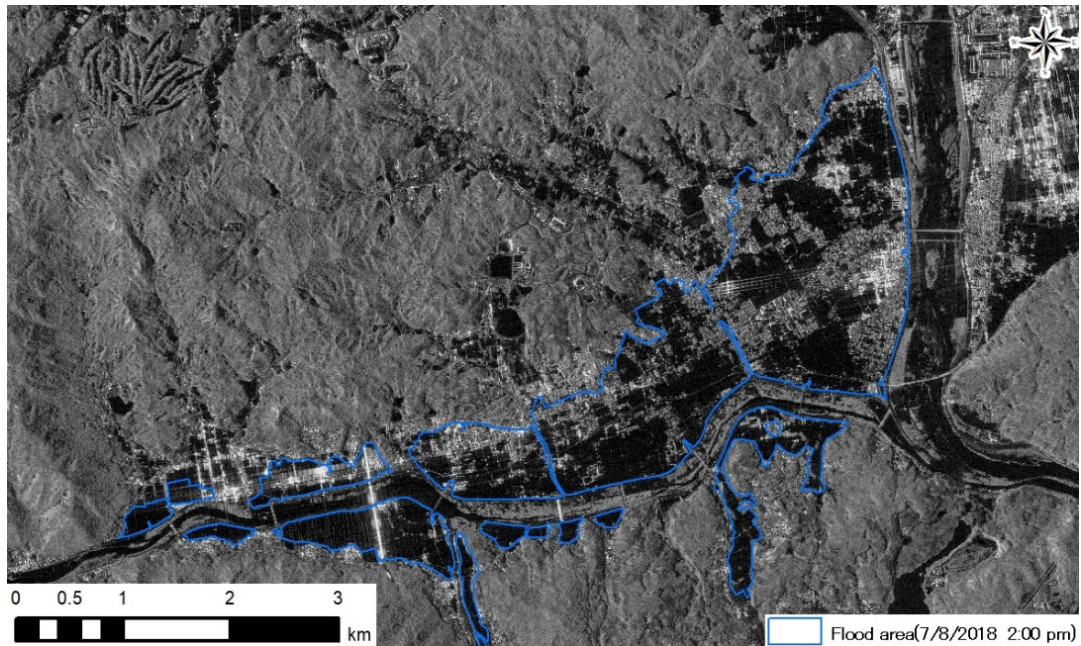


図 2.2 災害後の後方散乱係数画像 (2018/7/8)

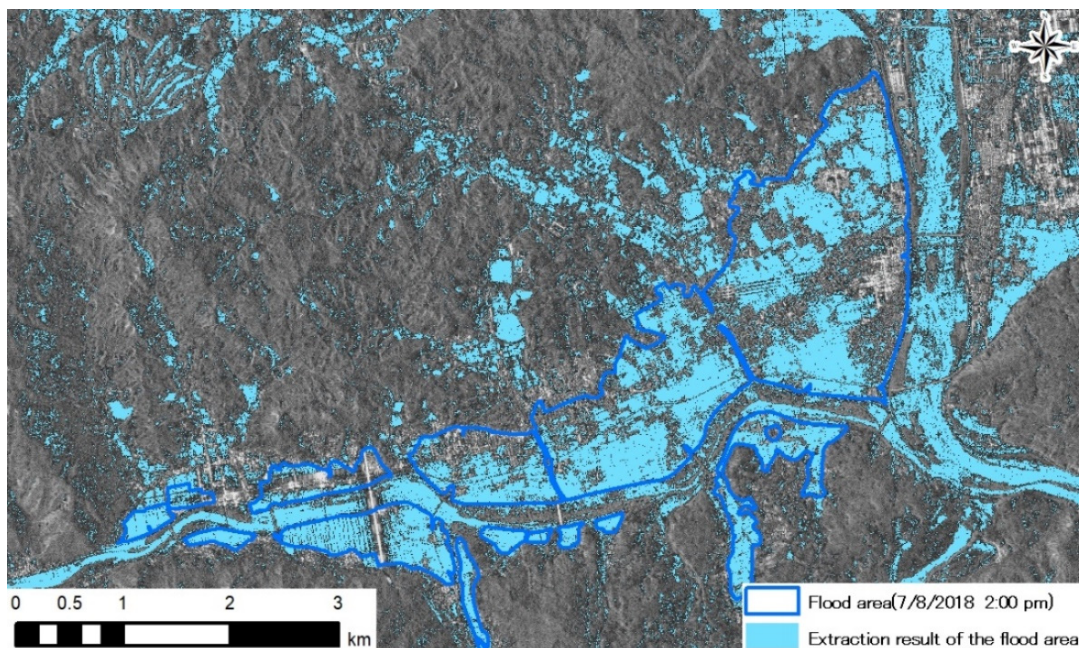


図 2.3 災害後の後方散乱係数画像を用いた浸水域抽出結果 (2018/7/8)



### 2.1.3. 浸水域の抽出における衛星画像の課題の整理

これまで実施されている手法においては、簡易的であり大凡の浸水域は抽出可能であった[59]。また、これらの解析手法による浸水域の抽出結果は JAXA により政府および地方自治体に提供され利用されてきている[60]。光学衛星画像を用いた浸水域の抽出においては、マルチスペクトル情報を利用した高分解能衛星画像を用いた抽出手法の検討が行われている[61]。加えて豪雨による洪水のみならず津波被害による浸水域の抽出手法の検討が行われてきている[62,63]。SAR 衛星画像を用いた浸水域の抽出は基本的に強度情報を利用した抽出が行われているが、コヒーレンス値を利用した浸水域の抽出が検討されてきている[64]。また、フリーに入手可能な中分解能衛星画像を用いた速報的な浸水域の抽出結果も報告されている[65]。2.1.1. および 2.1.2. で示す現状の解析技術の整理から下記の課題点を有することが確認された。そこで、水害発生時の浸水範囲などの抽出・把握に特化した実用性の高い光学・SAR 衛星画像の双方の特性を活かしながら空間情報を併用した浸水域抽出手法の開発・提案を行った。

#### (1) 光学画像および SAR 画像の共通の課題

- ・ 家屋などの構造物が隣接する箇所は浸水面が捉えられず、浸水の確認がとれない
- ・ 目視判読結果と比較し、整合がとれない個所が存在する
- ・ 2 時期画像の比較・差分画像を用いる場合、観測時期の違いが影響する可能性がある

#### (2) 光学衛星画像固有の課題

- ・ 被雲がある場合、観測画像は解析に利用できない可能性がある
- ・ 従来検討されている NDWI 指標値は中間赤外域の波長帯が必要であり、光学センサで搭載されていない波長帯である場合が多い
- ・ NDWI 指標は既存水域にも反応する傾向がある

#### (3) SAR 衛星画像固有の課題

- ・ ノイズが含まれるため、事前のフィルタ処理あるいは抽出後の GIS 処理が必要である
- ・ 家屋などの構築物が隣接する領域は高反射がその周辺の画素まで影響し、浸水域としてとらえられない個所が存在する

## 2.2. 光学衛星画像データによる GSI 指標を用いた浸水域の抽出および改善手法の提案

本項では、整理した課題に対する改善手法について検討する。なお、改善結果の評価については国土地理院による空中写真の目視判読結果を参照し、抽出率、正答率で評価することとする。まず、課題で掲示した下記の点について改善手法を検討する。

- ・ 水域抽出のための NDWI 指標は浸水被害での活用範囲が明確ではない
- ・ 中間赤外は光学センサに搭載されていない場合が多い
- ・ 準リアルタイム中分解能衛星画像の被害域抽出のための適用性が明確ではない
- ・ 構造物が隣接する箇所は浸水面として評価できない
- ・ 衛星画像のみの解析による抽出手法が多い

### 2.2.1. 使用データ

ここでは、近年で比較的浸水被害が大きく、甚大な被害があった平成 27 年 9 月年関東・東北豪雨における常総市，平成 30 年 7 月豪雨における倉敷市真備町の浸水被害について光学衛星画像によるスペクトル情報について調査し，改善方法を検討する．各災害について災害後に観測された光学衛星画像を用いた．平成 27 年 9 月関東・東北豪雨で使用した WorldView-3 衛星画像を図 2.4，図 2.5 に示す．また，国土地理院による空中写真を用いた推定浸水範囲を図 2.6 に示す．平成 30 年 7 月豪雨で使用した SPOT 衛星画像を図 2.7 に示す．さらに同様に国土地理院による空中写真を用いた推定浸水範囲を図 2.8 に示す．用いた浸水推定範囲は，衛星の観測時間と最も近いものを利用した．表示方法はそれぞれ人の目と同様に視認できるように可視バンドを赤，緑，青バンドに割り当てて作成したトゥルーカラー合成画像であり，それぞれの観測諸元を表 2.1，表 2.2 に示す．

表 2.1 WorldView-3 の観測条件（災害前）

観測日	2015/4/12	仰角	70°
オフナディア角	18°	方位角	215.8°
太陽高度	58.0°	分解能（パンクロ）	0.3×0.3m
太陽方位角	144.5°	分解能（マルチ）	1.2m×1.2m



図 2.4 WorldView-3 衛星画像（災害前）

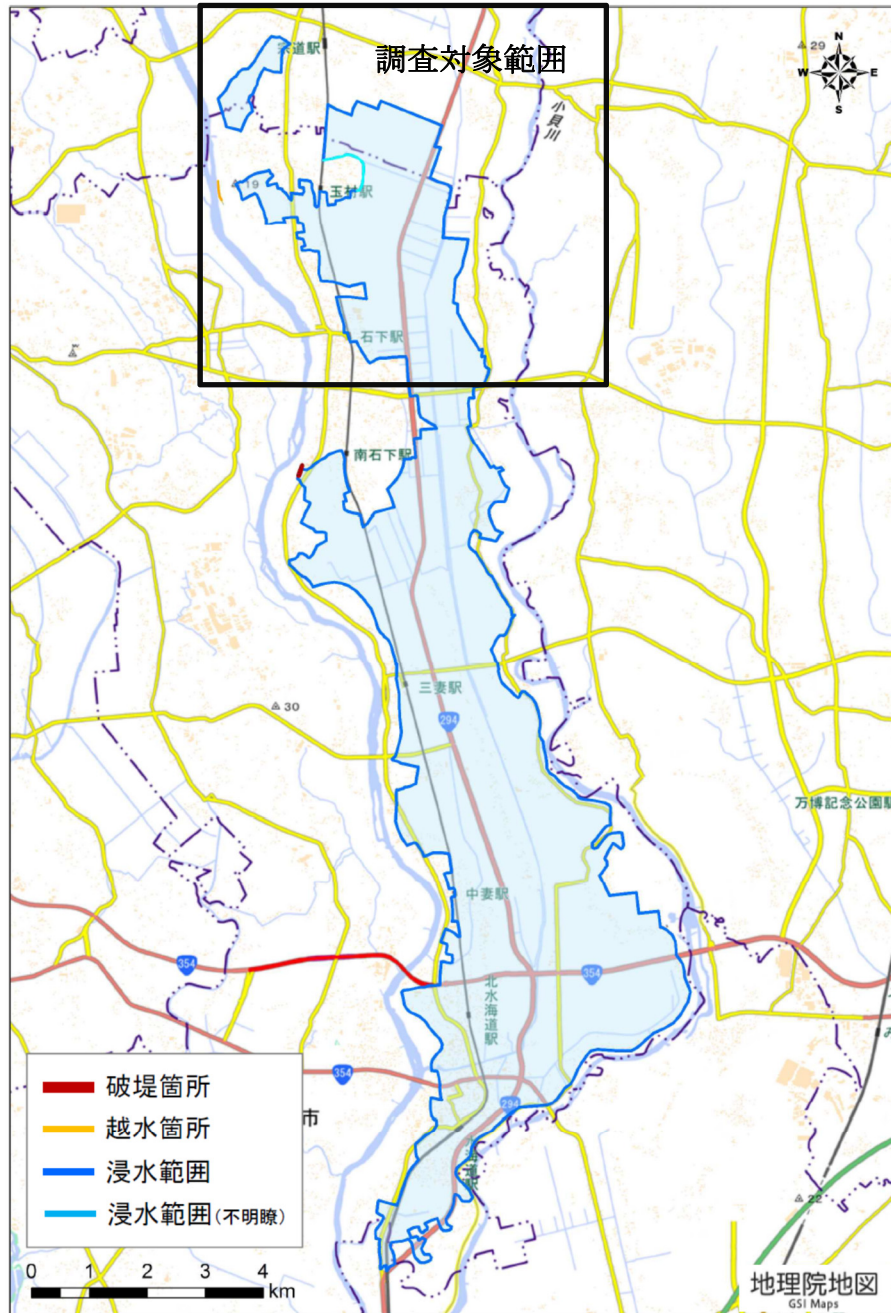
表 2.2 WorldView-3 の観測条件（災害後）

観測日	2015/9/11	仰角	75°
オフナディア角	13°	方位角	357.3°
太陽高度	56.0°	分解能（パンクロ）	0.3×0.3m
太陽方位角	153.2°	分解能（マルチ）	1.2m×1.2m



図 2.5 WorldView-3 衛星画像（災害後）

平成27年9月関東・東北豪雨に係る茨城県常総地区推定浸水範囲  
(9月11日10:00時点)



国土地理院くにかぜⅢ撮影(9月11日10:00時点)の画像判読により推定。  
浸水範囲は、面積約31平方キロメートル、東西約4キロメートル、南北約17キロメートル。

この推定浸水範囲は、空中写真(斜め写真)を基に浸水した範囲を判読したものですので、実際に浸水のあった地域でも把握できていない部分があります。また、雲等により浸水範囲が十分に判読できていないところもあります。

国土交通省  
**国土地理院**  
Geospatial Information Authority of Japan

図 2.6 茨城県常総地区の推定浸水範囲 (国土地理院：9月11日10時時点) [66]

表 2.3 SPOT-7 の観測条件（災害後）

観測日	2018/7/9	方位角	180.1°
入射角	9.1°	分解能（パンクロ）	0.3×0.3m
太陽高度	64.6°	分解能（マルチ）	1.2m×1.2m
太陽方位角	111.2°		

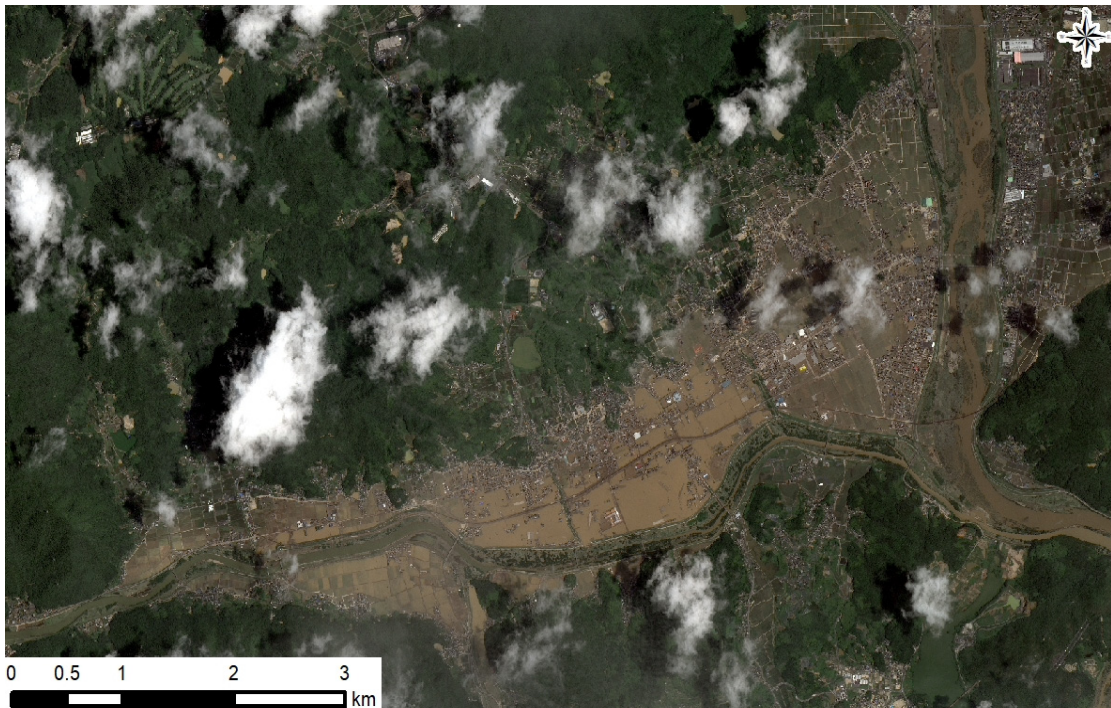


図 2.7 SPOT-7 衛星画像（災害後）

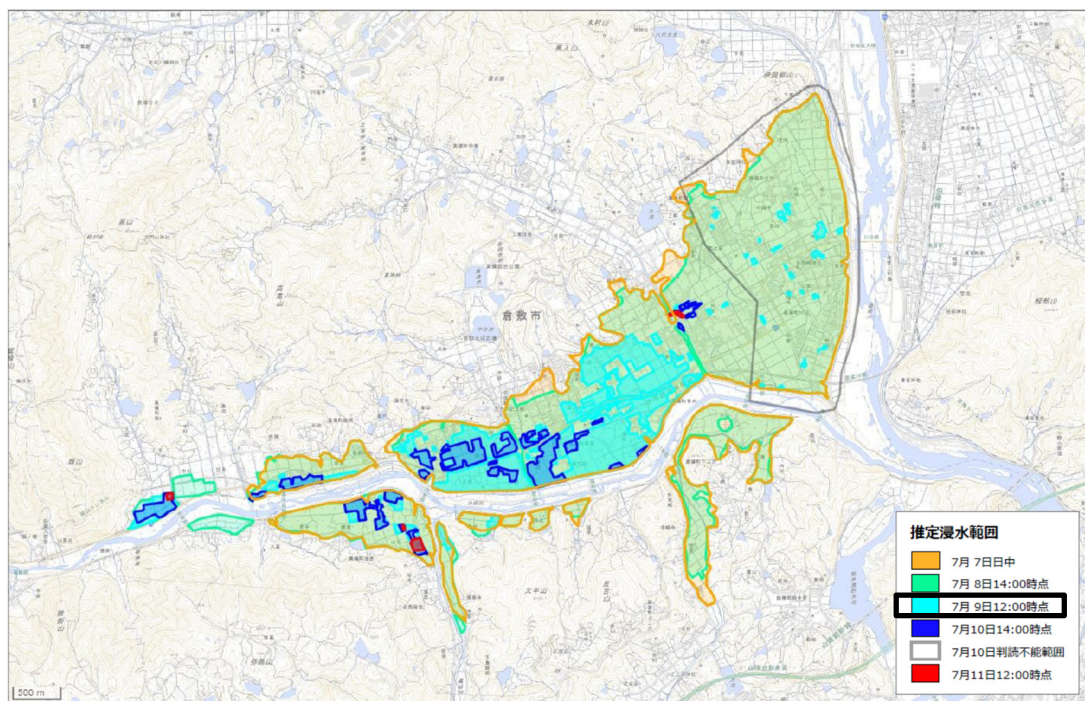


図 2.8 岡山県倉敷市真備町の推定浸水範囲（国土地理院） [67]

### 2.2.2. 光学衛星画像による浸水域のスペクトル調査

ここでは、災害前後画像を用いて浸水域と非浸水域のスペクトル特性を調査した。比較方法としては浸水域、氾濫河川、平常河川、土壌の4分類で画素値を集計した。集計位置を図 2.9 に示す。なお、前処理として国土地理院が発行する数値標高モデル (DEM) の 10m メッシュ (標高) を用いて衛星画像データのオルソ化を行った。なお、常総市の地形は平坦であるため、オルソ化による補正量は微小であることが考えられる。光学衛星画像データは大気による散乱・吸収の影響を除去する必要がある。また、太陽高度や入射角が異なる場合、地表面からの反射率は異なる。そのため、使用する衛星画像データについてまず(5)の式を用いて DN 値から放射輝度( $L_\lambda$ )に変換し、(6)の式より反射率( $\rho$ )に変換した。

$$L_\lambda = \text{Gain} * \text{DN} + \text{Offset} \quad (5)$$

$$\rho = \pi * L_\lambda * d^2 / \text{ESUN}_\lambda * \sin \theta \quad (6)$$

- Gain : ゲイン
- DN : デジタルナンバー
- Offset : オフセット
- d : 太陽地球間距離
- ESUN $_\lambda$  : 分光太陽照度
- $\theta$  : 太陽天頂角

災害後の画像について浸水域と波長特性が近いと考えられる氾濫河川や平常河川および土壌を対象に 50m×50m で画素値をサンプリングした。サンプリング個所のスペクトル特性を図 2.10 に示す。なお、凡例に示す数字は図 2.9 に示すサンプリング個所を示している。各バンド帯の平均値を比較すると、氾濫河川も含まれるが、バンド 2 (緑バンド) およびバンド 3 (赤バンド) において顕著な違いがあることがわかった。特にバンド 2 においては浸水域と非浸水域の画素値の差が大きいことがわかった。画像判読からも浸水範囲において、濁度が高い鬼怒川からの抽出や周辺の土が混合したことにより、泥水が分布していることから確認できた。

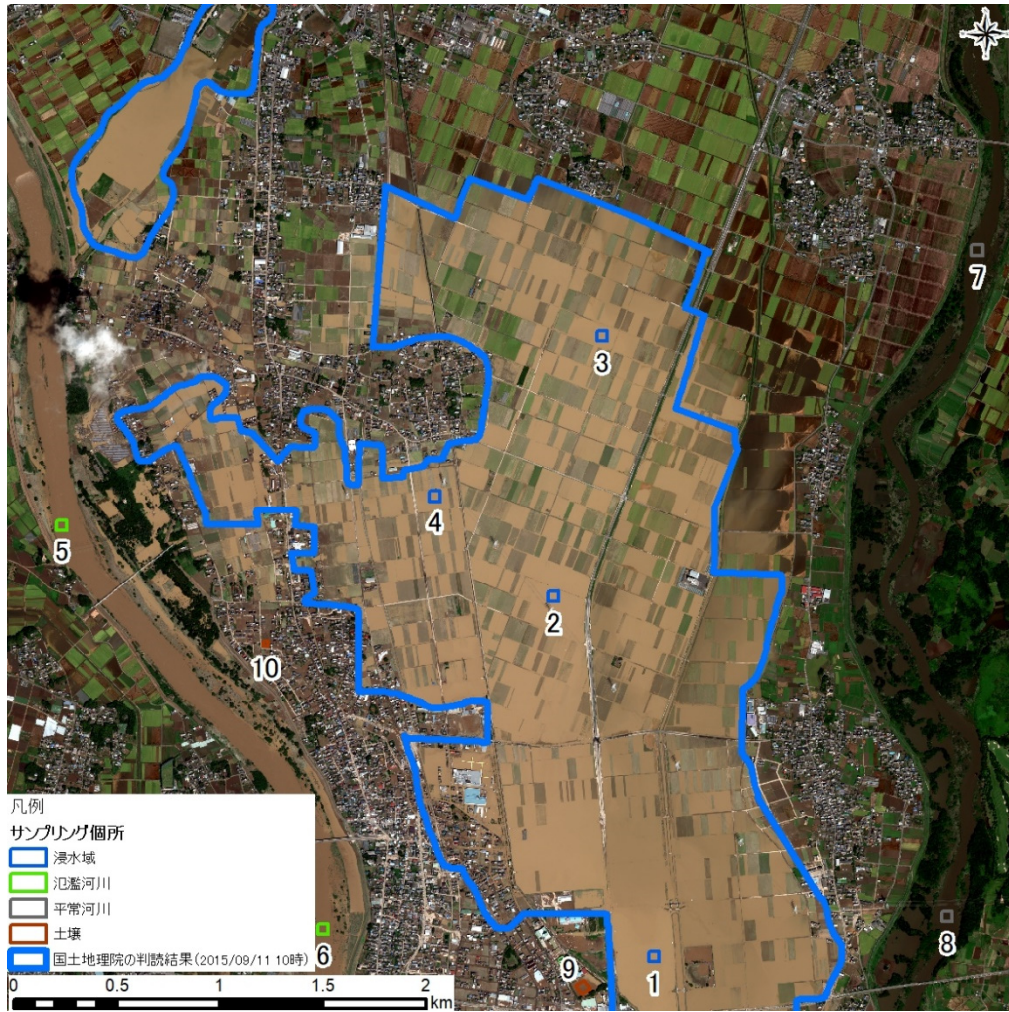


図 2.9 サンプルング個所の位置図

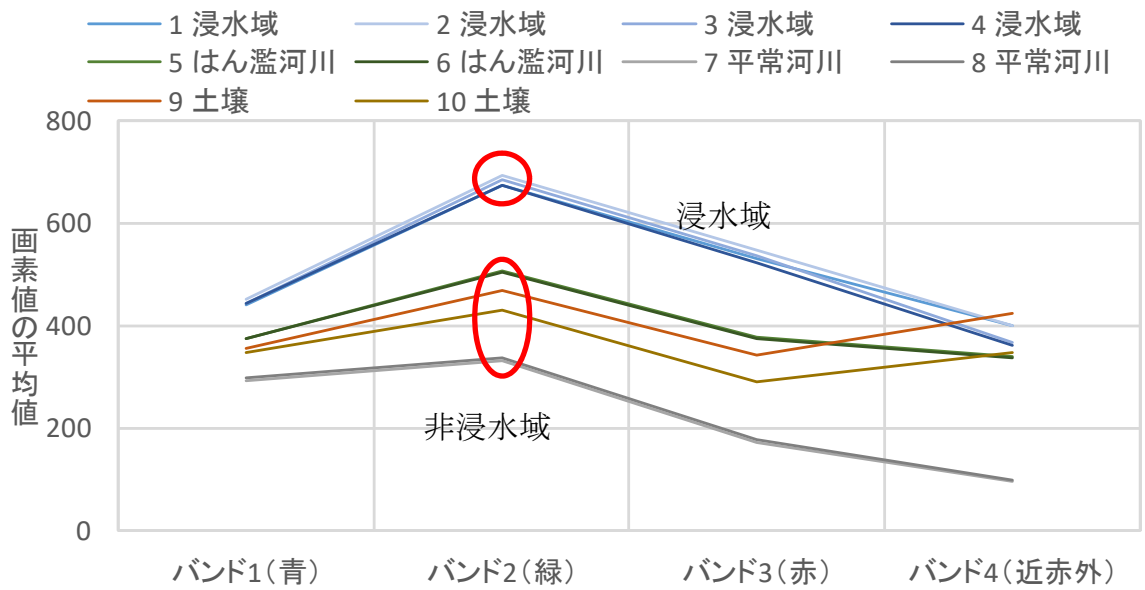


図 2.10 サンプルング個所のスペクトラル特性 (災害後画像)



### 2.2.3. 差分解析による浸水域の抽出

災害前後画像のダイナミックレンジを比較すると、レンジ幅が大きく異なることが確認された。このまま差分解析を行うと誤抽出個所が点在する可能性がある。そのため、災害後画像を災害前画像の平均値および標準偏差が一致するように画像の濃度変換後に差分画像を作成した。差分画像および差分画像のヒストグラムを図 2.11, 図 2.12 に示す。得られたヒストグラムから判別分析法を適用することで閾値を求め、浸水域を抽出した。判別分析法はヒストグラム形状に基づき 2 値化となる値を設定し、ゼロとヒストグラムの累積値を使用して、閾値の値を算出する手法である[68]。



図 2.11 災害前後の差分画像

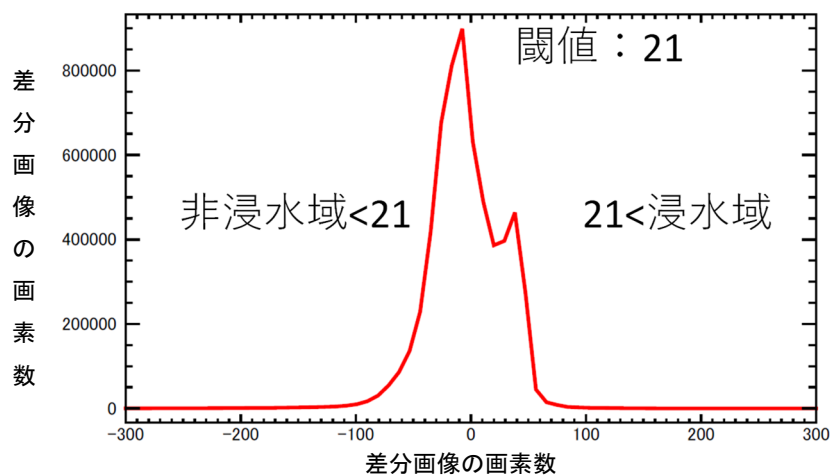


図 2.12 差分画像のヒストグラム

差分画像により浸水域の抽出結果を図 2.13 に示す[60]。国土地理院（9月11日10時時点）の推定浸水域と比較すると抽出率の評価で64%であり、正答率は75%であった。浸水域に囲まれる非浸水域の補正や国土数値情報の河川データを用いて対象域の河川幅を200mと仮定し、河川域を除外すると抽出率は68%、正答率は79%に上昇した。主な誤差の要因として、推定浸水域中の住宅密集地が抽出できていないことや衛星画像からは浸水していない範囲が国土地理院の推定範囲に含まれていることが挙げられる。本解析結果から浸水域が泥水であった場合、災害前後の可視光波長帯域の緑バンドを用いて差分解析を行うことにより、大凡の浸水域が抽出できることがわかった。

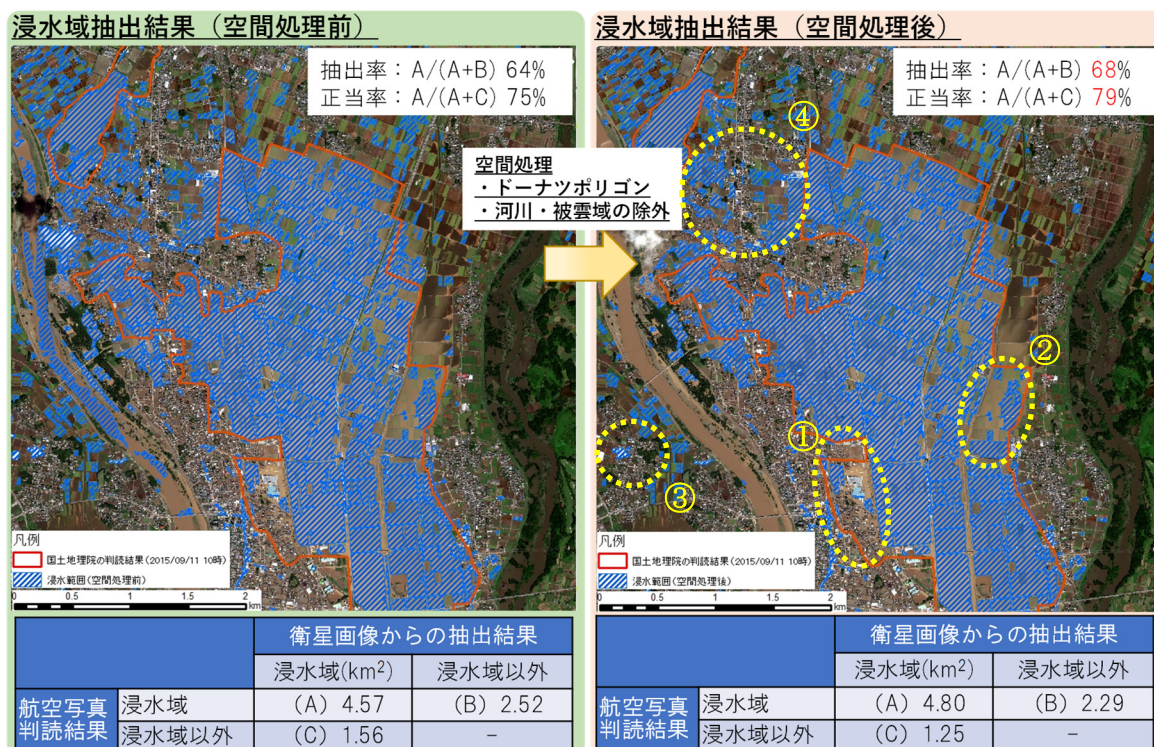


図 2.13 浸水域の抽出結果

誤抽出個所の要因を下記に示す。

① 住宅密集地の浸水域が未抽出

家屋を含む道路上の浸水箇所は家屋の屋根と道路上の浸水域がミクセルになり、抽出が困難

② 閾値の設定による未抽出

閾値近傍の未抽出箇所が点在した。これらは誤抽出とトレードオフのため、複数バンドを用いた段階的な浸水域抽出が必要

③ 家屋の屋根が白色のような高輝度の場合、浸水域と誤抽出

上空から家屋の浸水の有無は把握が困難

④ 土壌と浸水の判別が同等の値のための誤抽出

非浸水においても砂の流出による泥水の色調が同等であり、複数バンドを用いた段階的な浸水域抽出が必要

#### 2.2.4. GSI 指標を用いた浸水域の抽出と精度評価

災害後画像から泥や砂が混じることが理由で、浸水域は一様に明るい茶色であることが確認された。これは平成 27 年 8 月の関東・東北豪雨における常総市の浸水被害についても同様な傾向が確認されている。そのため、反射率補正後の災害後画像を用いて、一般に裸地域の抽出や砂漠化の指標に用いられている GSI 値[69]を用いた浸水域の抽出手法を検討した[70]。具体的には GSI 値を用いて得られたヒストグラムと抽出結果から試行的に閾値を設定することにより、浸水域の抽出を検討した。また、精度評価の手法として抽出率と正答率の評価を用いた。GSI 画像を図 2.14 に、GSI 画像のヒストグラムを図 2.15 に示す。なお、GSI 画像は (7) に式を用いて算出した。Band1 から Band3 はそれぞれ可視光青、緑、赤波長帯域を示す。GSI 値は 1 に近づくほどここでは浸水域の傾向を示す。

$$GSI = (\rho_3 \text{Band3} - \rho_1 \text{Band1}) / (\rho_3 \text{Band3} + \rho_2 \text{Band2} + \rho_1 \text{Band1}) \quad (7)$$

$\rho_n$  : n バンドの反射率

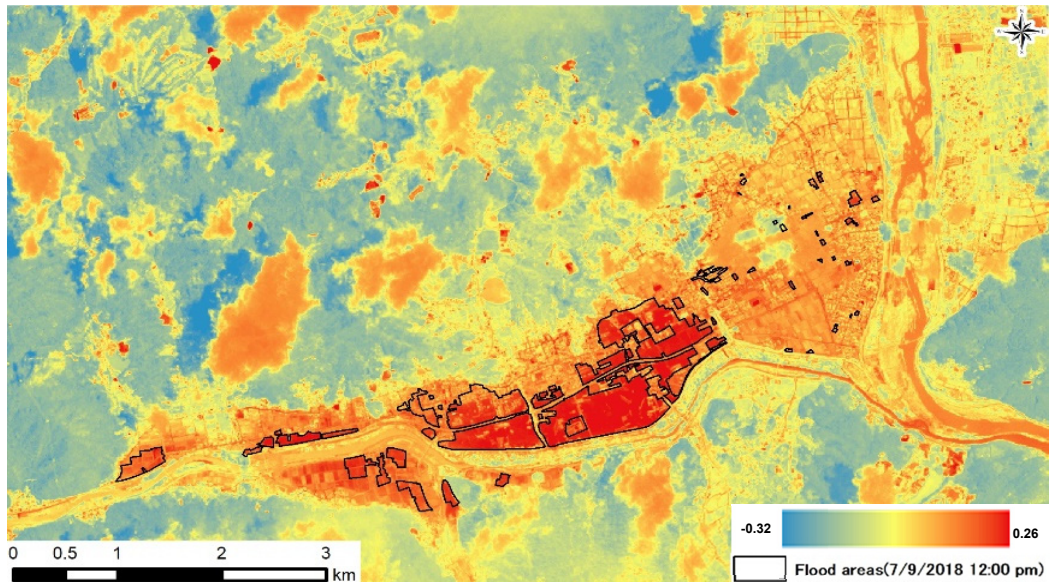


図 2.14 GSI 画像

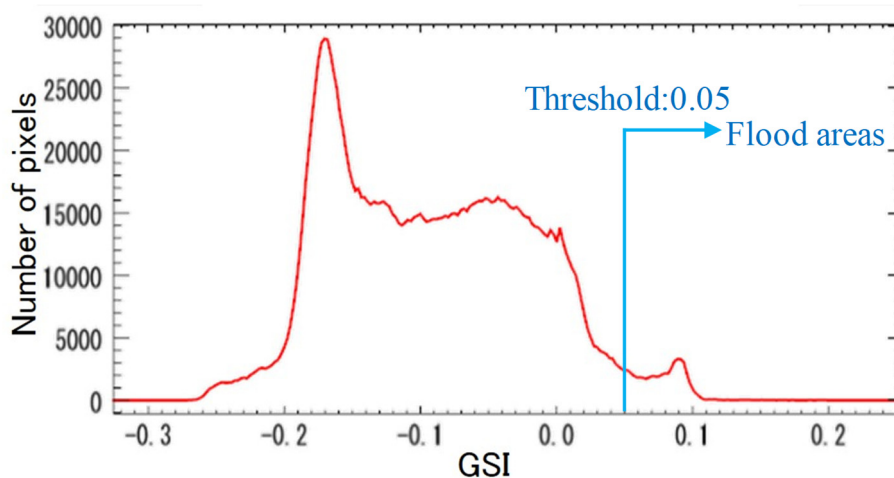


図 2.15 GSI 画像のヒストグラム

GSI 画像による浸水域の抽出結果を図 2.16 に示す。また、浸水域の抽出結果から得られた精度評価結果を表 2.4 に示す。精度評価結果から抽出率が 70%、正当率は 73%程度で大凡の浸水域が抽出可能であった。ただし、目視判読結果の浸水域以外においても抽出されていることから補正方法を検討する必要がある。また、主な誤抽出個所を図 2.17 に示す。主な過剰抽出領域としてグラウンドで確認された。さらに衛星と空中写真の観測時間の差 (1.5h) が理由と推測される領域が確認された。主な未抽出領域として住宅密集地であったことが確認された。

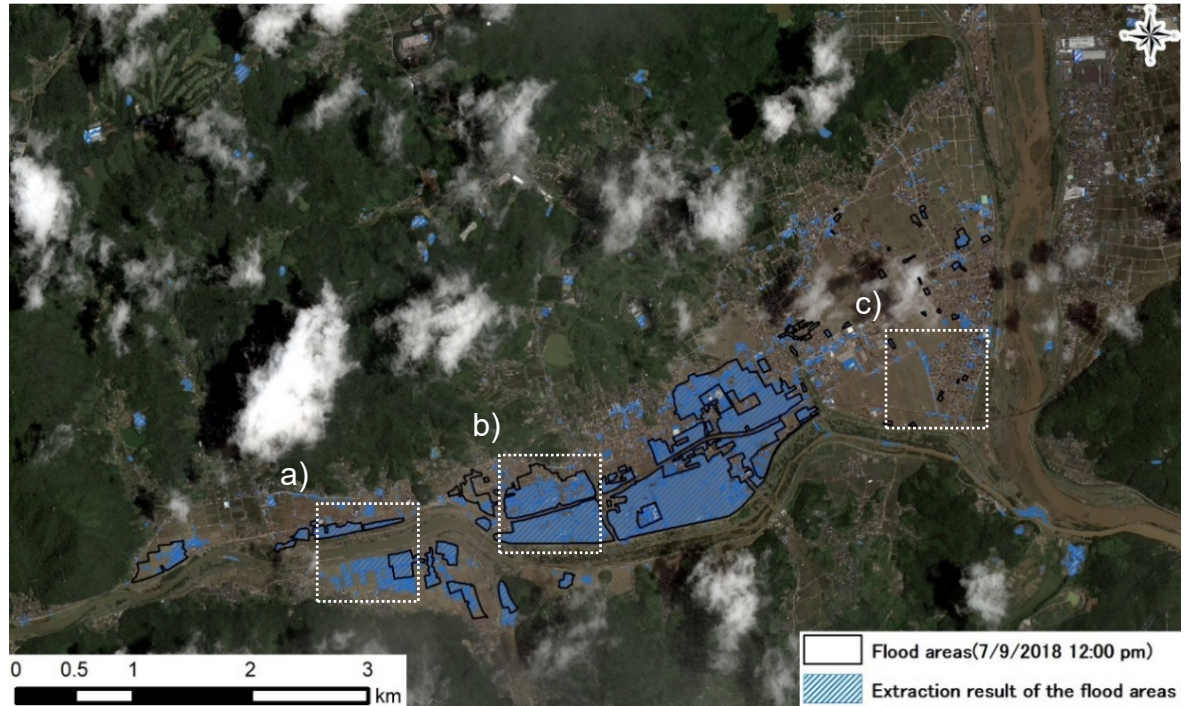


図 2.16 浸水域の抽出結果

表 2.4 浸水域の抽出結果

		衛星解析による浸水域の抽出結果	
		浸水域 (km <sup>2</sup> )	非浸水域 (km <sup>2</sup> )
空中写真による浸水域の判読結果	浸水域 (km <sup>2</sup> )	(A) 1.37	(B) 0.49
	非浸水域 (km <sup>2</sup> )	(C) 0.49	-

抽出率 (%) :  $A / (A + B) * 100$ , 正答率 (%) :  $A / (A + C) * 100$

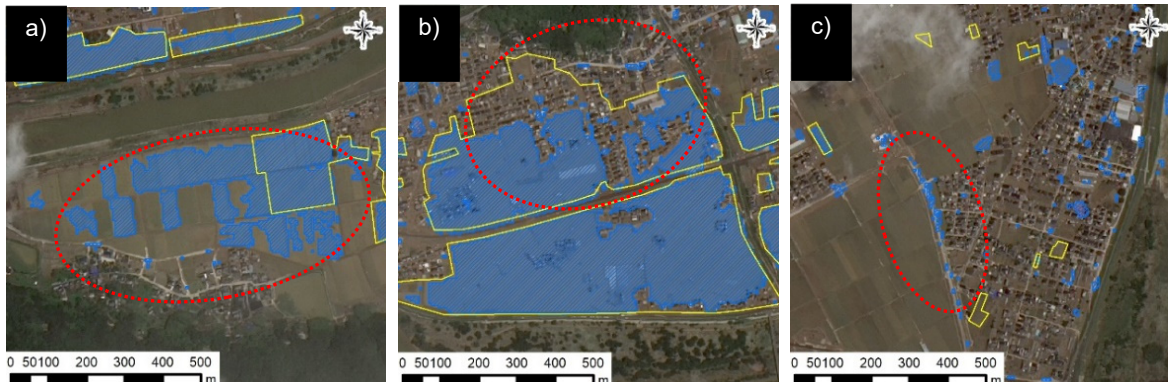


図 2.17 主な誤抽出個所

### 2.2.5. DEM データおよび空間処理による改善手法の提案

抽出結果から山間部において過抽出領域が点在している領域が見られた。そこで浸水被害が発生しにくい高い標高領域を除外することで浸水域の正確性の向上を試みた[69]。対象領域内に河川をはさんで南北に位置する山々を除外した。標高 20m 以上の山域を除外した抽出結果を図 2.18 に示す。図 2.16 に示す改善前の結果と比較し、過剰抽出領域が除外されていることが確認できる。

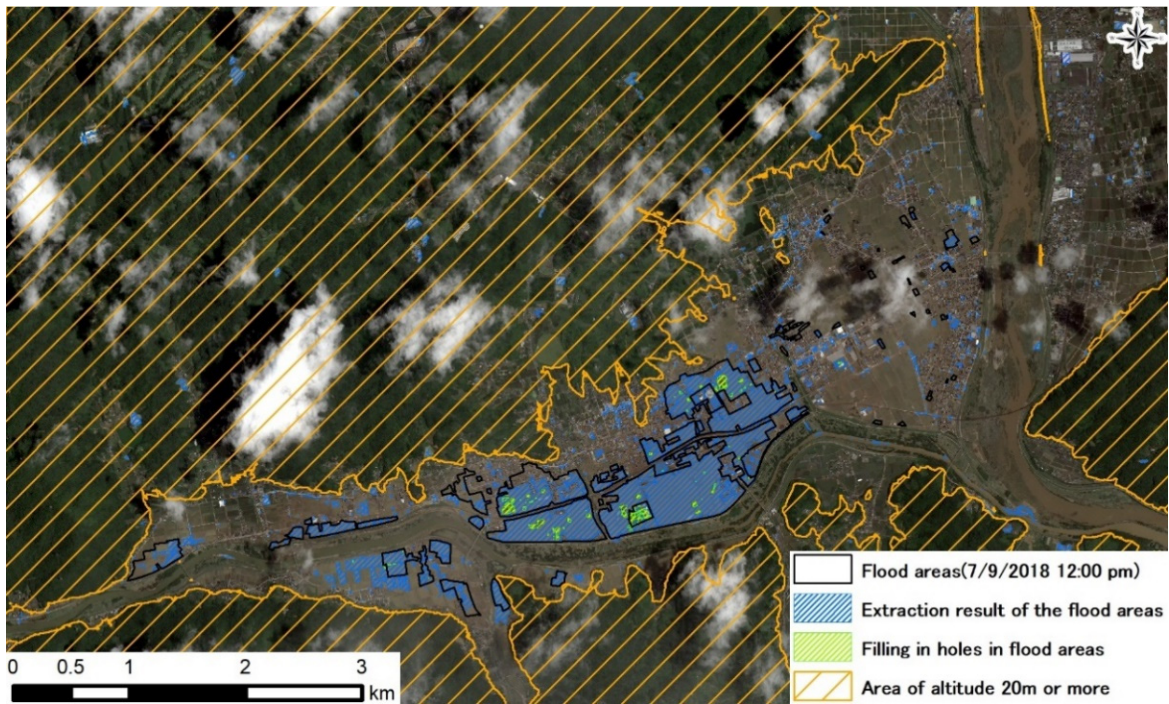


図 2.18 浸水域の抽出結果の改善①

## 2.2.6. 街区データを用いた改善手法の提案

DEM データを用いた過剰抽出個所の抽出では、浸水域と考えにくい領域を除外することが目的であった。一方、家屋が隣接する建物領域においては未抽出個所の改善には至っていない。そこでここでは、建物領域における抽出困難領域の抽出手法を検討した[69]。従来、DEM データなどの標高値を用いて浸水到達域を推定していたが、決壊箇所や水量、流速が必要となるため、このような情報が必要となる場合が多い。そこで本稿ではあくまで浸水域の面的な評価を併せた街区ポリゴン内による浸水域と建物ポリゴンの占有率から街区毎に評価することで改善方法を検討した。道路データより作成された街区ポリゴンと国土数値情報からダウンロードした建物のポリゴンデータ（平成 30 年度版）を図 2.19 に示す。なお、街区データは国土地理院が発行する標準地図および道路データを用いることにより、縮尺 500 分の 1 を維持する精度で作成した。なお、街区ポリゴンのサイズは標準地図が 4,000 分の 1 で示される道路（ズームレベル 17）を基本として街区とした。街区ポリゴンと建物ポリゴンと浸水域個所の面的な関係性を示すものを図 2.20 に示す。

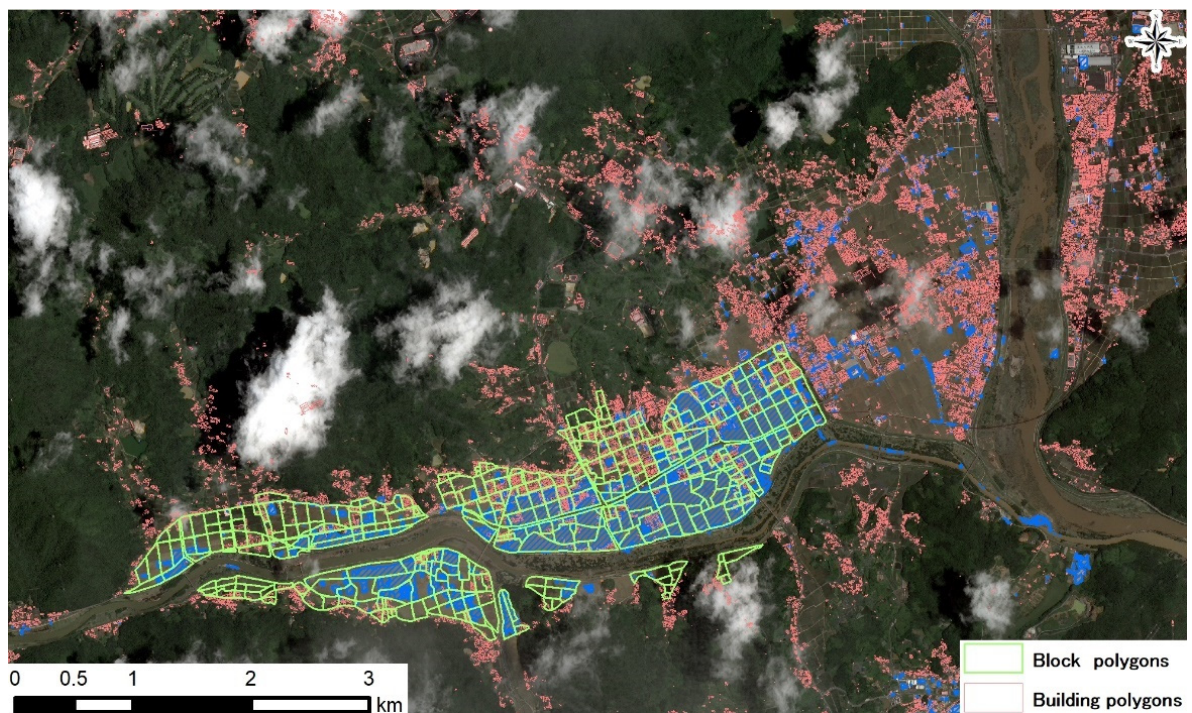


図 2.19 作成した街区ポリゴン

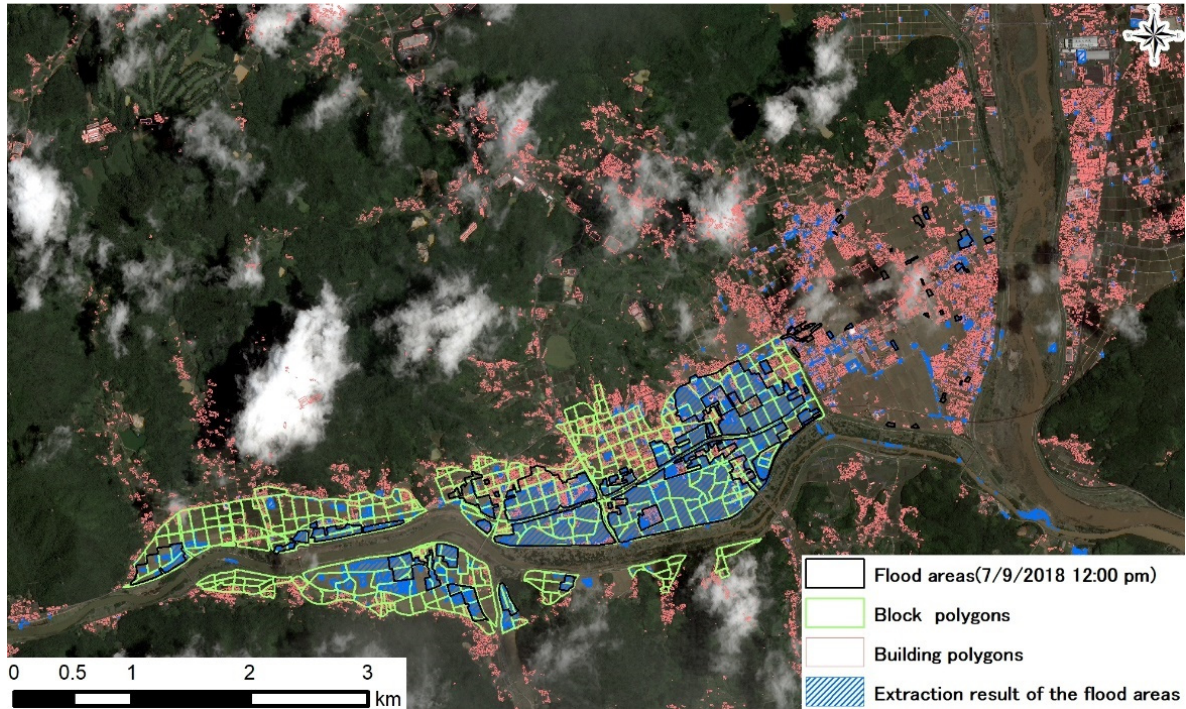


図 2.20 街区ポリゴンと浸水域の位置図

街区データにおける浸水域と建物面積の比率を図 2.21 に示す。なお、建物および浸水域の街区内の割合が 0 の街区は図 2.21 より除外した。街区内の建物面積の割合と空中写真の浸水域の割合は薄い橙色で示し、街区内の衛星により抽出した浸水域の割合と空中写真により判読された浸水域の割合は薄い青色で示す。これらの街区内の衛星により抽出した浸水域の割合と空中写真により判読された浸水域の割合の決定係数 ( $R^2$ ) は 0.7 程度であり、高い値となることがわかる。このことは改善手法適用前においても比較した空中写真の判読された浸水域と衛星解析により抽出した浸水域の関係性が高いことを示す。

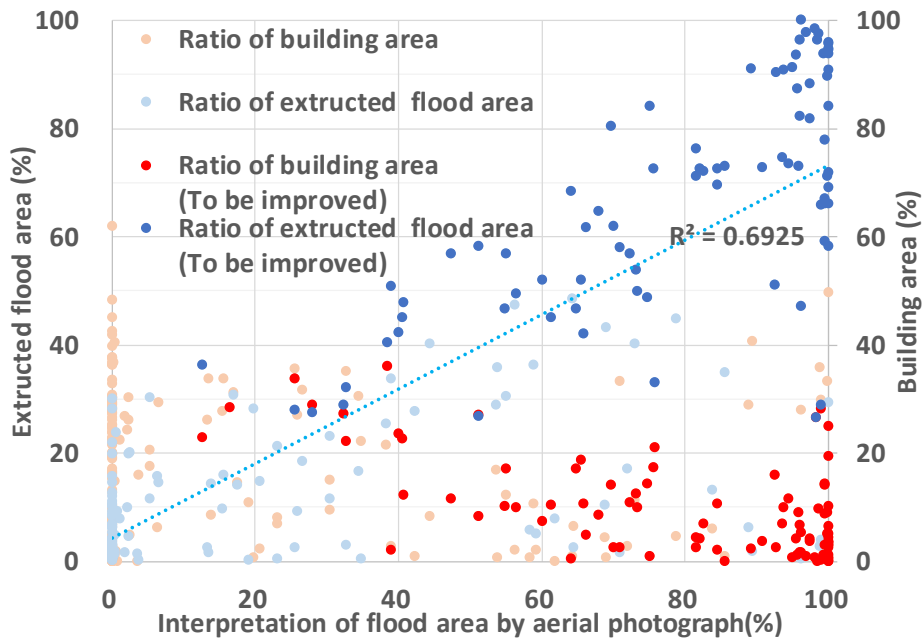


図 2.21 街区ポリゴンにおける浸水域と建物面積の比率

得られた街区データから建物面積と抽出した浸水域の面積の街区面積の割合を算出し、(8)式に示す条件で街区毎に浸水域を判定した。なお、本条件は建物面積および抽出した浸水域がそれぞれ 25%以上で街区内に存在することを示す。

$$\{ \text{Flood ratio} > 0.25 \} \text{ and } \{ (\text{Flood ratio} + \text{Building ratio}) > 0.5 \} \quad (8)$$

本条件により浸水域と判定した街区ポリゴンは濃い青色および赤色で示す(図 2.21 参照)。また、判定結果の説明図を図 2.22 に示す。街区ポリゴンにおける浸水域と建物面積の割合について赤い点線で囲まれている街区は浸水域として判定した。下に補正された街区ポリゴンの特徴を示す。

- ・ 街区内の建物面積が低く、衛星解析による浸水域の割合が高い街区ポリゴンが選定されていることがわかる。これらは衛星解析においても浸水域と判定された領域である
- ・ 街区内の衛星解析による浸水域の割合と建物面積の割合が比較的高い街区ポリゴンにおいて改善されていることがわかる。これらは建物が隣接する密集領域であり、衛星解析において非浸水域と判定された領域の傾向を持つ。

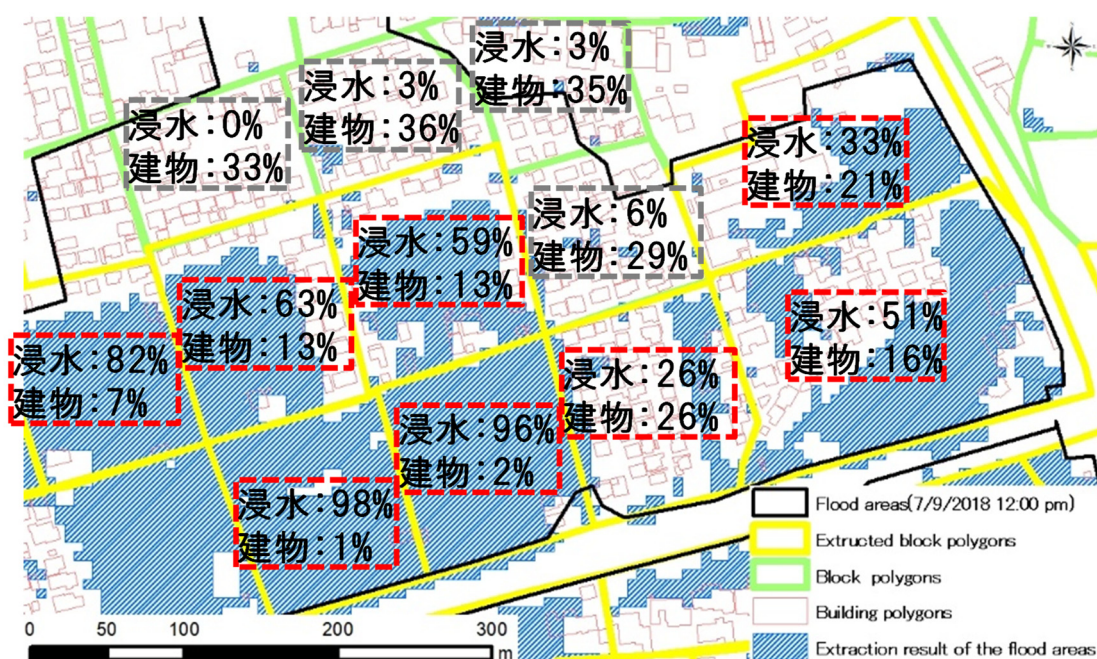


図 2.22 判定結果



補正後の浸水域抽出結果を図 2.23 に示す。浸水域の判読結果と比較し、街区内に住宅密集地が存在するポリゴンにおいて浸水域と正しく判定している領域が多くあることがわかる。一方、街区内に建物密度が高い街区においては、建物の屋根の色が支配的なため、浸水域を抽出することが困難であった。より、高分解能な衛星画像を用いることで建物間の浸水域を抽出することが可能となり、本改善手法の効果を期待できると考えられる。各補正手法における評価結果を表 2.5 に示す。また、抽出精度は 85% となり、12% 向上することができた。正答率は 70% となり、6% 減少した。

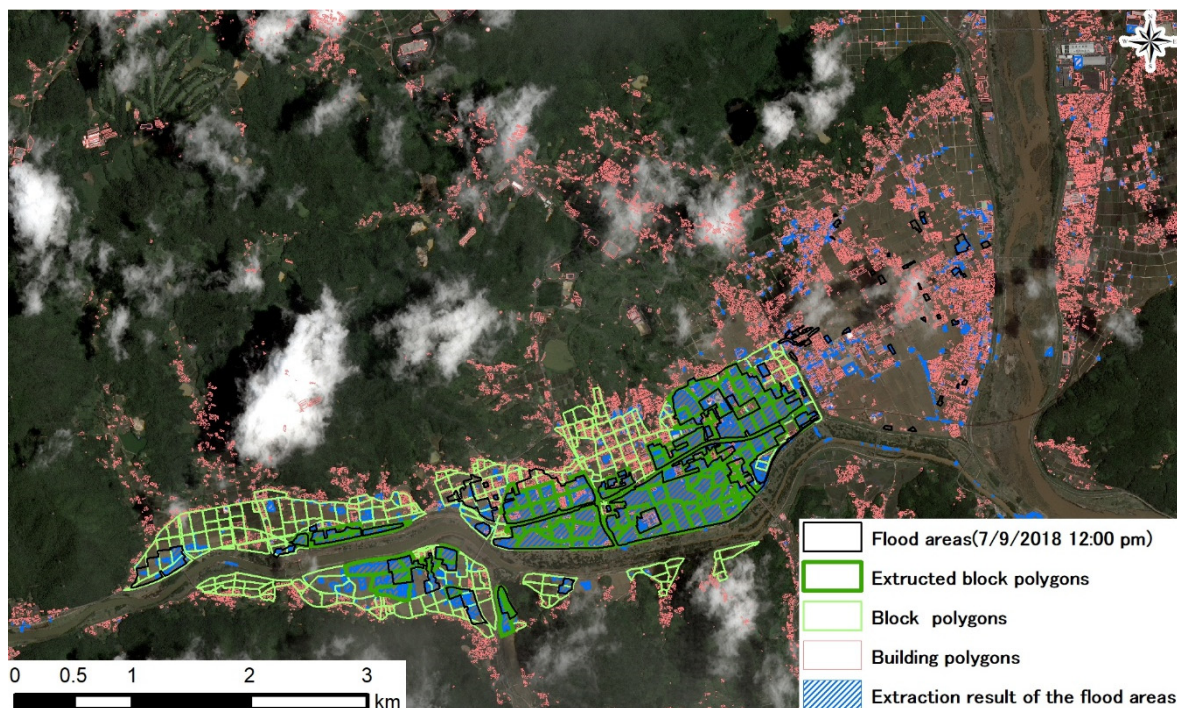


図 2.23 街区データによる補正結果

表 2.5 浸水域の精度評価

解析手法	抽出率	正当率
災害後の光学衛星画像の GSI 値	70%	73%
DEM データおよび空間処理による改善手法	73%	76%
街区ポリゴンを用いた改善手法	85%	70%

### 2.3. SAR 画像データによる浸水域の抽出と改善手法の適用性の評価

本研究では、災害前後の L バンド SAR 衛星画像を用いて岡山県倉敷市真備町の浸水域の抽出手法を検討した。従来では災害後や災害前後の SAR 画像を用いた後方散乱係数による浸水域の抽出が行われており、建物の立地個所の浸水状態が判断できない課題があった。そこでここでは災害前後に観測された SAR 画像情報による干渉解析コヒーレンスから得られたコヒーレンスデータを用いた改善手法について検討した。

#### 2.3.1. 使用データ

使用する L バンド SAR 画像は ALOS-2/PALSAR-2 により観測されたデータである。なお、観測条件は災害前後画像で同様であり、季節差による植生の状況を考慮し、同季節に観測された画像を使用した。使用した災害前後の SAR 衛星画像の観測諸元を表 2.6 に、使用データを図 2.24 に示す。また、参照データとして衛星観測時間と最も近い国土地理院による空中写真の目視判読結果を使用した。なお、本項ではアジアの浸水域の抽出を想定し、建物 GIS データがない場合での改善手法を検討する。

表 2.6 使用した SAR 衛星データの観測諸元

観測日	2016/7/9 (災害前)	2018/7/8 (災害後)
観測モード	Strip Map	
偏波	HH	
オフナディア角	38.2°	
衛星進行方向	北行方向	
観測方向	右向き (西から東)	



図 2.24 使用データ

### 2.3.2. SAR 衛星画像における後方散乱係数画像の生成

ALOS-2 衛星画像の振幅情報を用いて局所入射角を考慮した後方散乱特性の基本物理量である後方散乱係数( $\sigma_0$ )に変換した。なお、後方散乱係数は入射角に大きく依存する。一般的に入射角が大きい場合、鏡面反射成分(衛星方向と逆方向のマイクロ波の反射強度)が大きくなり、後方散乱係数成分は小さくなる。ここでは、抽出精度に影響を及ぼすと思われる地形形状を考慮し、局所入射角を用いた。局所入射角( $\phi$ )は視線方向( $I$ )と斜面の法線ベクトル  $N$  のなす角として定義される(図 2.25 参照)。局所入射角の算出式を(9)に示す。 $I$  は SAR 衛星からの視線方向とオフナディア角、 $N$  は標高データ (DEM) より算出が可能である。ここでは、メッシュサイズは約 10m の基盤地図情報(数値標高モデル)を利用した。後方散乱係数は衛星から照射されたマイクロ波が地表面で散乱し、衛星に戻ってきた強度を示す。DN 値から後方散乱係数への変換式を(10),(11)に示す。また、詳細な後方散乱係数の変化による判読を行うため、オルソ化により位置合わせを行った。災害前後の後方散乱係数画像を図 2.26、図 2.27 に示す。

$$\cos \phi = N \cdot I / |N| |I| \quad (9)$$

$$\beta_0 \text{ dB} = 10 \cdot \log_{10} (\text{DN}^2) \quad (10)$$

$$\sigma_0 \text{ dB} = \beta_0 \text{ dB} + 10 * \log_{10} (\sin \phi) \quad (11)$$

- DN : 画素値
- $\beta_0$  : Radar Brightness(明度)
- $\sigma_0$  : Radar Backscatter Coefficient(後方散乱係数)
- $\phi$  : local incidence angle(局所入射角)

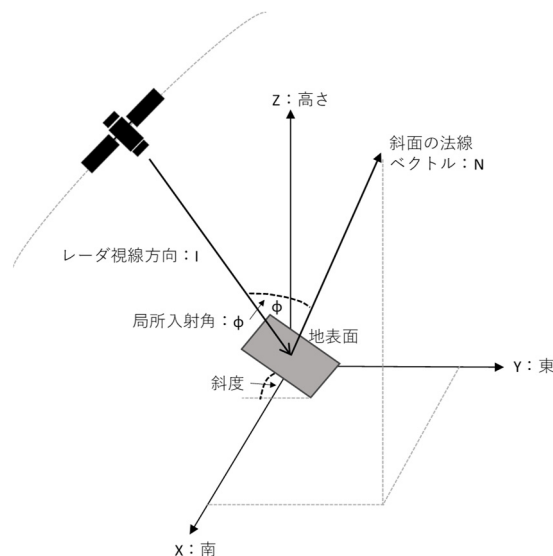


図 2.25 局所入射角のイメージ図

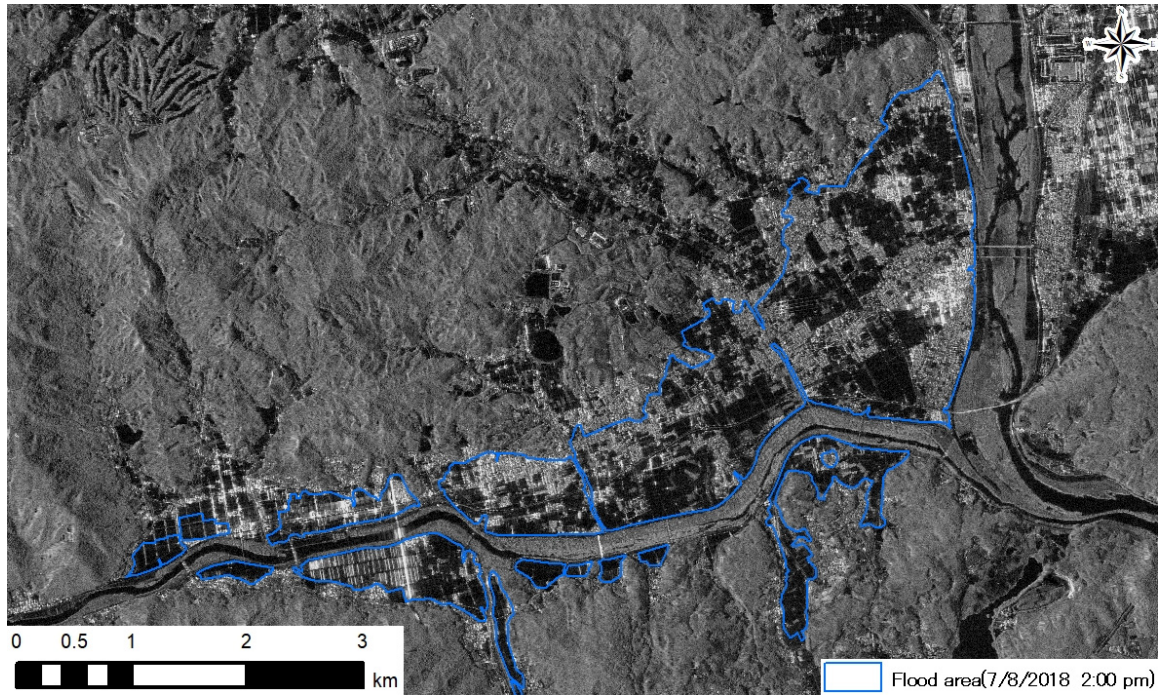


図 2.26 災害前の後方散乱係数画像 (2016/7/9)

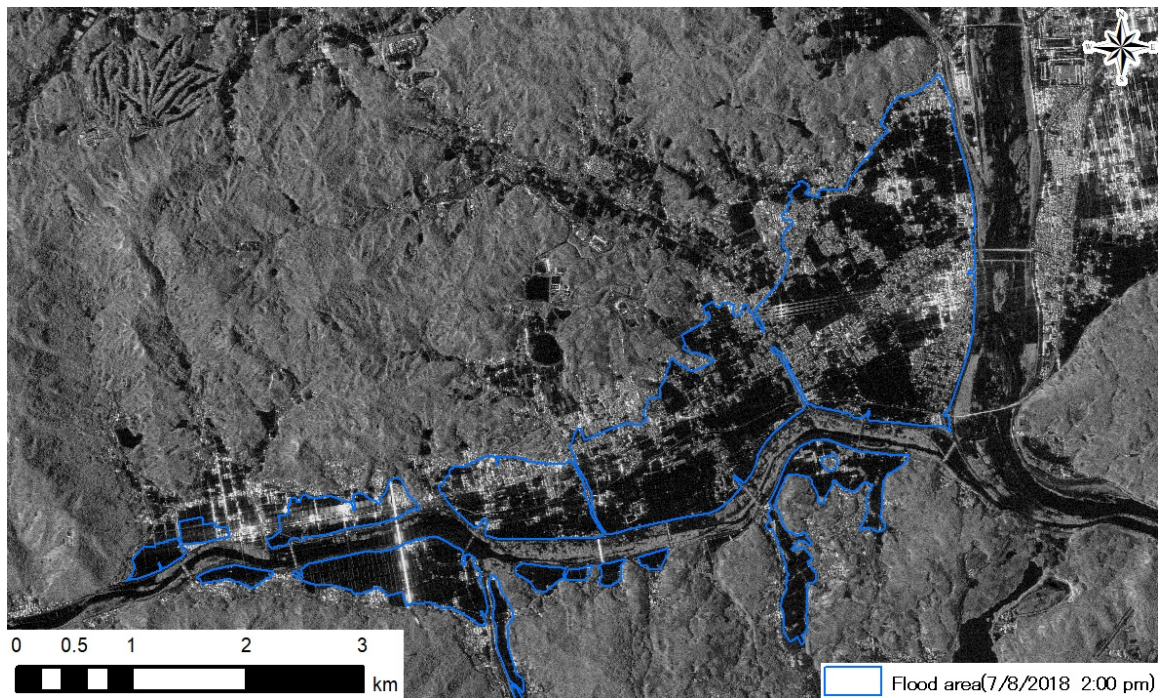


図 2.27 災害後の後方散乱係数画像 (2018/7/8)

### 2.3.3. コヒーレンス画像の生成

災害前後の SAR 画像の干渉解析結果から得られるコヒーレンス値から建物領域を抽出する。なお、光学衛星画像を用いた地震被害による被害建物の抽出については災害前後画像のコヒーレントな特性を利用したテクスチャ解析が有効であることが検討されている[71]。一般的にコヒーレンス値は不動の地物の領域はコヒーレンス値が高く[72,73,74]、季節差が生じやすい植生や被害領域は低い傾向を示すことが多い[75,76]。コヒーレンス値は SAR 衛星画像に含まれる位相情報の複素数の値を用いることにより算出される(図 2.28 参照)。2 時期間で分散が大きい場合、値は 0 に近づき、変化が大きいとされ、分散が小さい場合、値は 1 に近づき、変化が小さいと判断できる。コヒーレンス値により得られた建物データを用いて、浸水建物を抽出し、強度画像により抽出した浸水域とマージすることによる浸水域抽出手法を提案し、精度を評価した。また、2 時期間で位置合わせされた SAR 画像 ( $S_1$  および  $S_2$ ) から、コヒーレント合計とインコヒーレント合計との間の比として干渉コヒーレンス ( $\gamma$ ) を(12)式を用いることにより算出した。コヒーレンス 0 と 1 の間の範囲をとる。

$$\gamma = \frac{|\sum s_1(x) \cdot s_2(x)|}{\sqrt{\sum |s_1(x)|^2 \cdot \sum |s_2(x)|^2}} \quad (12)$$

$\gamma$  : コヒーレンス値

$S_1$  : 実数

$S_2$  : 虚数

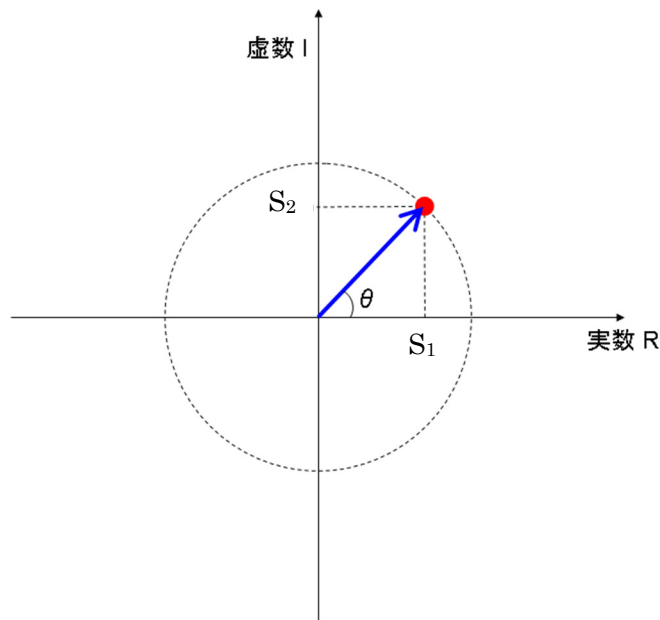


図 2.28 複素 SAR データの概念図

### 2.3.4. 災害前後カラー合成画像および差分画像の特性把握

災害前後の SAR 画像を R:災害後, G,B: 災害前に色付けしてカラー合成した画像を図 2.29 に示す。災害前から災害後に後方散乱係数が上昇した場合赤色に、災害後に後方散乱係数が低下した場合は青色に表示されるようカラー合成している。

浸水域から国土地理院が公表する 7 月 8 日の 14 時時点の航空写真を用いて目視判読の結果と比較して、浸水推定領域が全体的に青色に表示されていることにより、後方散乱係数が災害後に低下していることがわかる。これは浸水したことにより、鏡面反射成分が卓越したことが原因と考えられる。また、図 2.30 の災害前後画像の後方散乱係数のヒストグラムから災害後は高い後方散乱係数のピクセル数が減少し、低い後方散乱係数が増加していることがわかる。これらも浸水が発生した原因と考えられる。ただし、堤内域を流れる河川の流域幅も増加していることから全体的な低い後方散乱係数のピクセル数の増加に影響していることも考えられる。

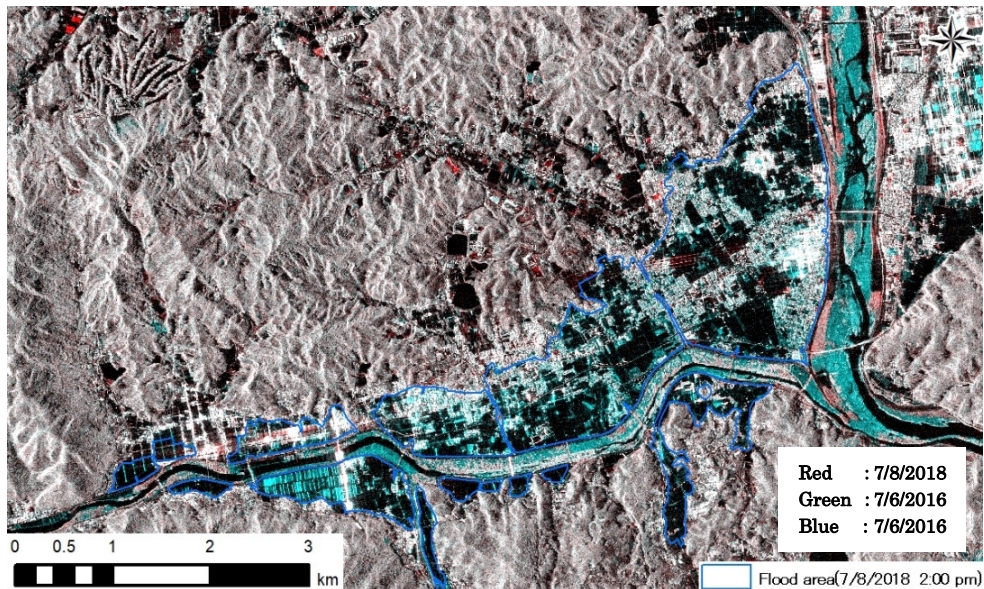


図 2.29 2 時期カラー合成画像

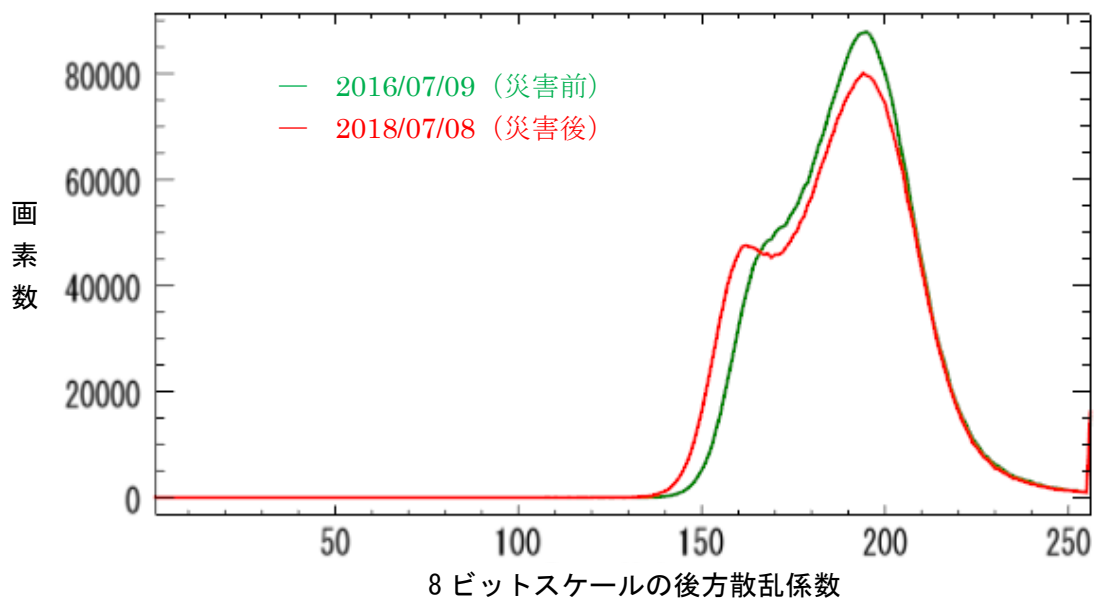


図 2.30 2 時期カラー合成画像のヒストグラム

災害前後の差分画像を図 2.31 に示す。災害前から災害後を減じているため、災害前の後方散乱係数が災害後の後方散乱係数より大きい場合は青く示されるよう表示した。

目視判読結果の推定浸水域と比較すると、浸水域は全体的に青く表示されていることがわかる。このことから災害後に後方散乱係数が低下したことが確認できる。この特性を利用して浸水域の抽出を検討する。

図 2.32 に差分画像のヒストグラムを示す。災害前から災害後を減じているため、プラスの領域ほど浸水域である可能性が高いことを示す。ヒストグラムは単峰型の形状を示すことが確認された。このことから明示的に浸水の有無を示す閾値を決定することは困難であると考えられる。そのため、ここでは平均値を閾値に設定した。なお、平均値は 0.05 であった。

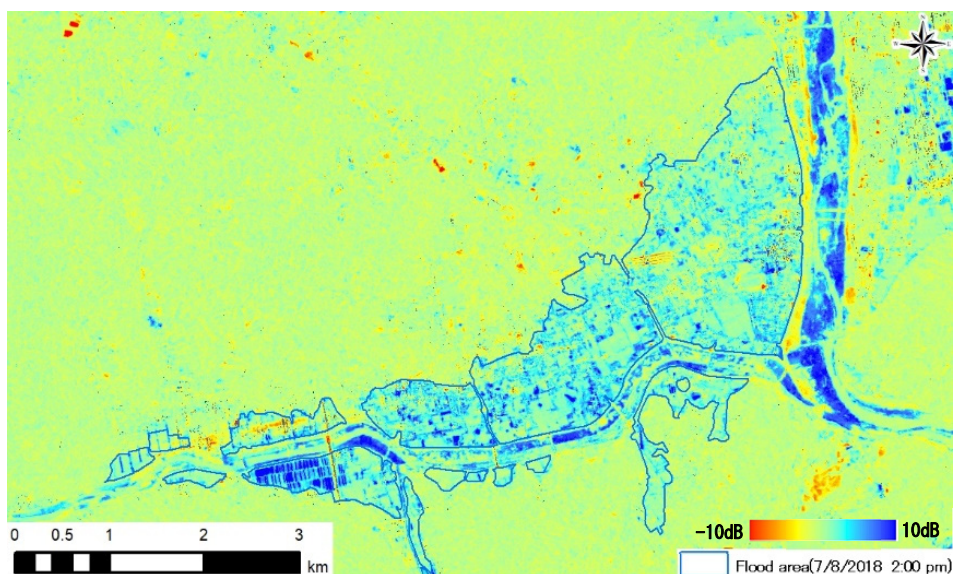


図 2.31 災害前後 SAR 差分画像 (災害前－災害後)

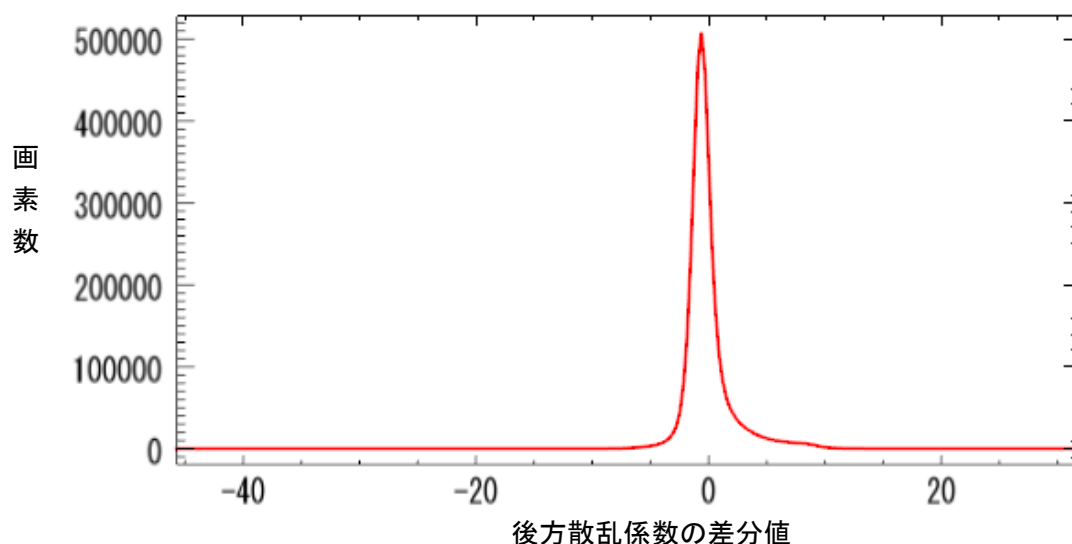


図 2.32 災害前後 SAR 差分画像のヒストグラム (災害前－災害後)

### 2.3.5. 差分画像による浸水域の抽出と評価

災害前後の差分画像から閾値を設定して得られた浸水域の抽出結果を図 2.33 に示す。大凡の浸水域は抽出していることが確認できた。また、対象範囲内で標高が比較的高い山域においても点々と抽出されていることが確認できた。これらはSAR画像特有のノイズと考えられる。加えて、後方散乱係数が比較的低い河川区域内の水域も抽出されていることがわかる。また、比較的高層の建物の高反射に起因する偽像（サイドローブ）が発生し、抽出不可であった領域も確認できた。加えて主な誤抽出箇所として建物の立地する領域とノイズによる過剰抽出箇所が確認された（図 2.34 参照）。この抽出結果をベースとして光学画像の解析結果の時と同様の改善手法を適用した。

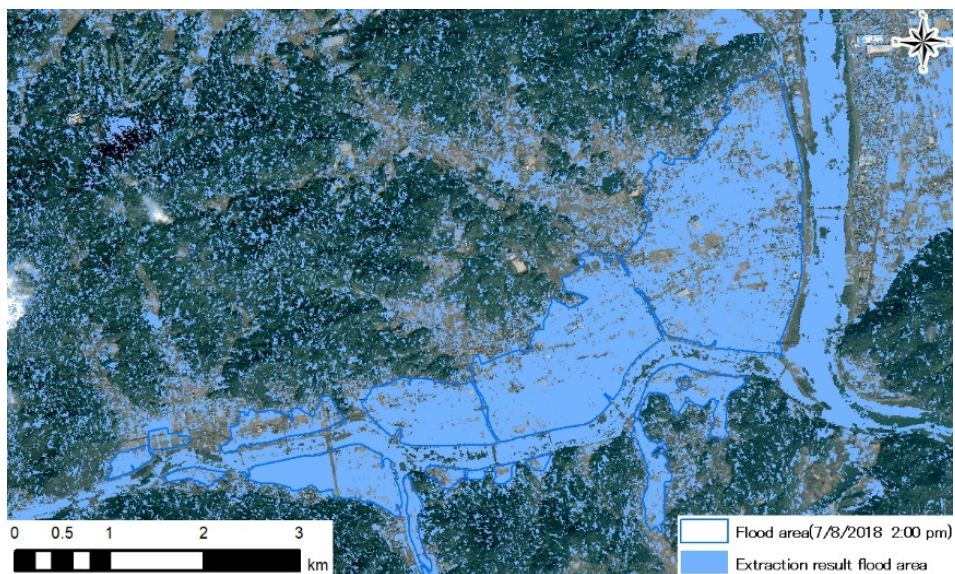


図 2.33 浸水域の抽出結果

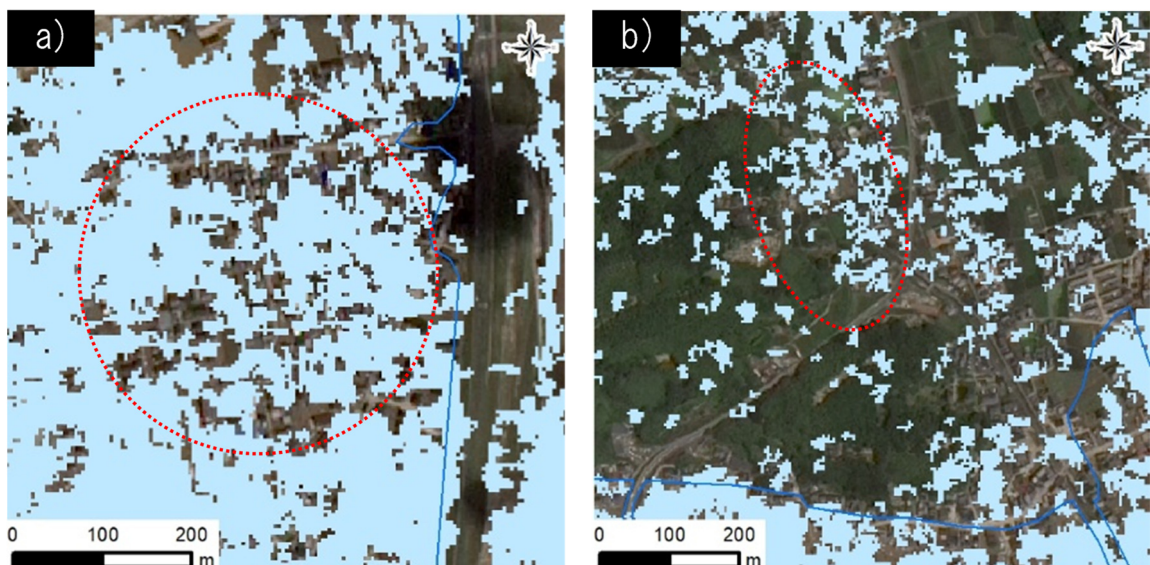


図 2.34 誤抽出箇所

(左：未抽出（住宅密集地） 右：過剰抽出（ノイズ）)



### 2.3.6. DEM データおよび空間処理による改善手法の提案

まず、光学衛星画像により堤外領域と考えられる河川区域を目視判読により作成し、浸水域から除外した。加えて、光学衛星画像による浸水域の抽出の改善手法と同様に国土数値情報より入手した 10mDEM データによる標高 20m 以上の領域を除外した。2 つの処理により改善した浸水域を図 2.35 に示す。

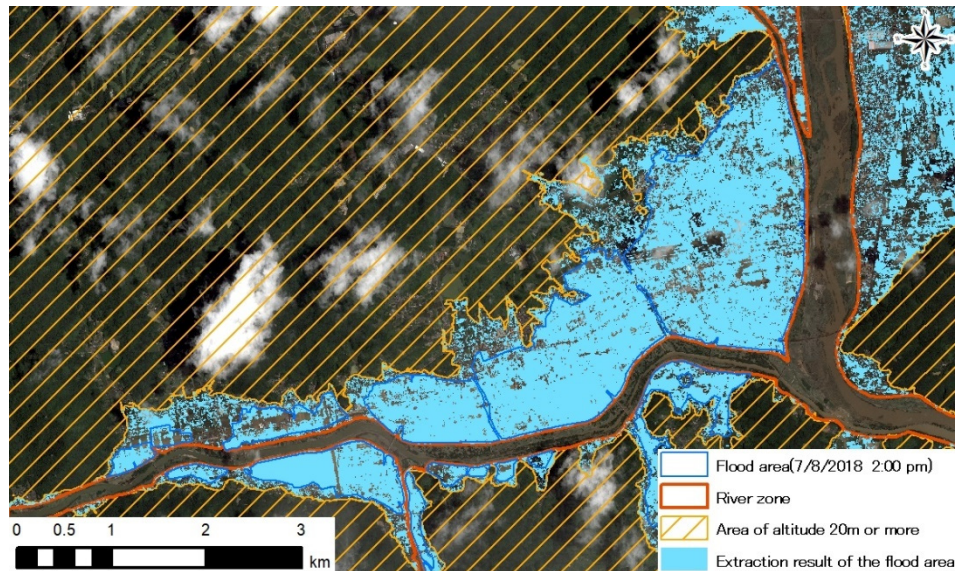


図 2.35 浸水域の抽出結果の改善①

次に浸水域に囲まれる非浸水域領域を対象に浸水域の可能性が高いと判断して浸水域に補正した。改善した浸水域を図 2.36 に示す。

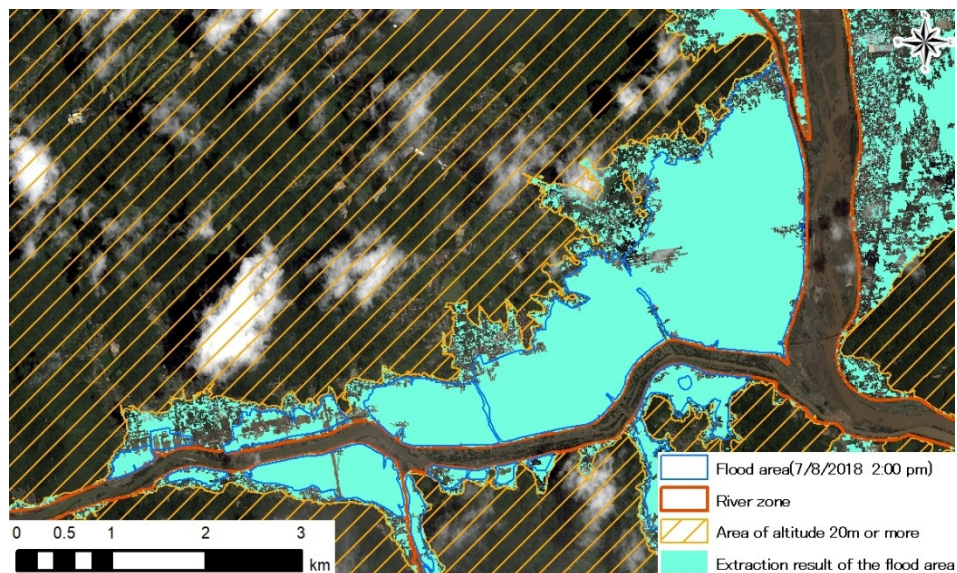


図 2.36 浸水域の抽出結果の改善②

### 2.3.7. 2 時期のコヒーレンス画像による建物情報の抽出

SAR 衛星画像は光学衛星画像と同様に建物領域が隣接する場合、建物領域の浸水面が捉えられないという課題がある。そこで、建物領域の浸水の有無を抽出を検討するため、災害前後のコヒーレンス画像を用いて建物領域の抽出を検討した。干渉 SAR データ解析では、干渉データの品質や位相精度を示し指標としてコヒーレンス（干渉性）がよく利用され、任意の干渉位相は、2 つの SAR 画素値（複素数）から、求められる。建物 GIS データと比較し、コヒーレンス画像の傾向を調査した。

図 2.37 にコヒーレンス画像、図 2.38 にコヒーレンス画像上に基本地図情報の建物ポリゴンを重ねた図を示す。

非浸水域において建物位置のコヒーレンス値が比較的高いことがわかる。一方、浸水域の建物位置では、コヒーレンスは比較的、低いことがわかる。これは浸水により建物周辺の地表面の変化によってコヒーレンス値が低下したことが理由と考えられる。

図 2.39 に浸水域・非浸水域の境界となる拡大図を示す。これらからも浸水域に比べ、非浸水域の建物位置はコヒーレンス値が高いことがわかる。

図 2.40 に建物位置の浸水域・非浸水域で区分したコヒーレンス値の平均値を示す。非浸水域は峰のトップが 0.5 程度であるのに対し、浸水域は 0.2 程度であった。

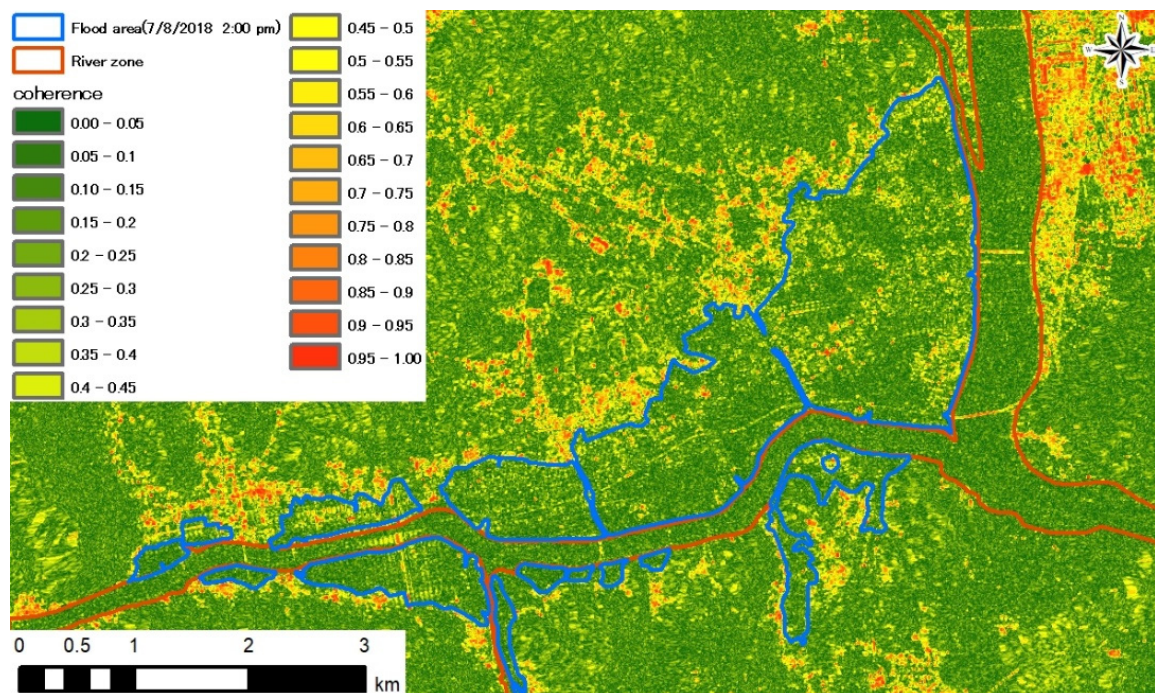


図 2.37 コヒーレンス画像

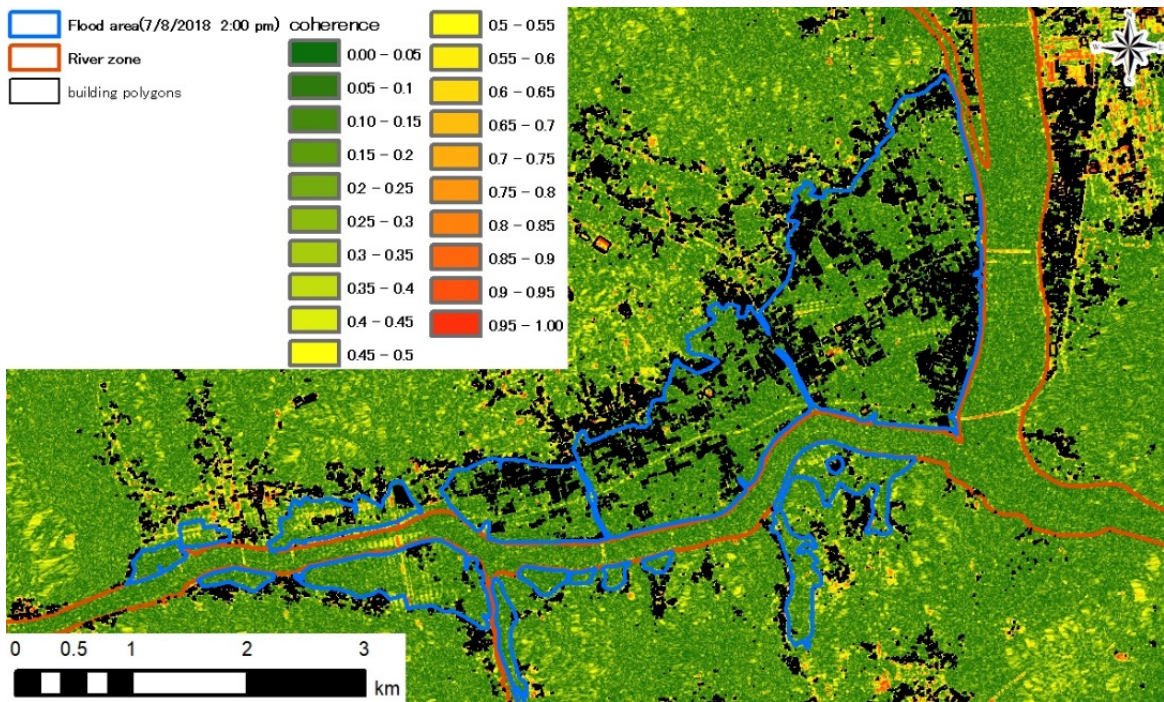


図 2.38 コヒーレンス画像と建物ポリゴン

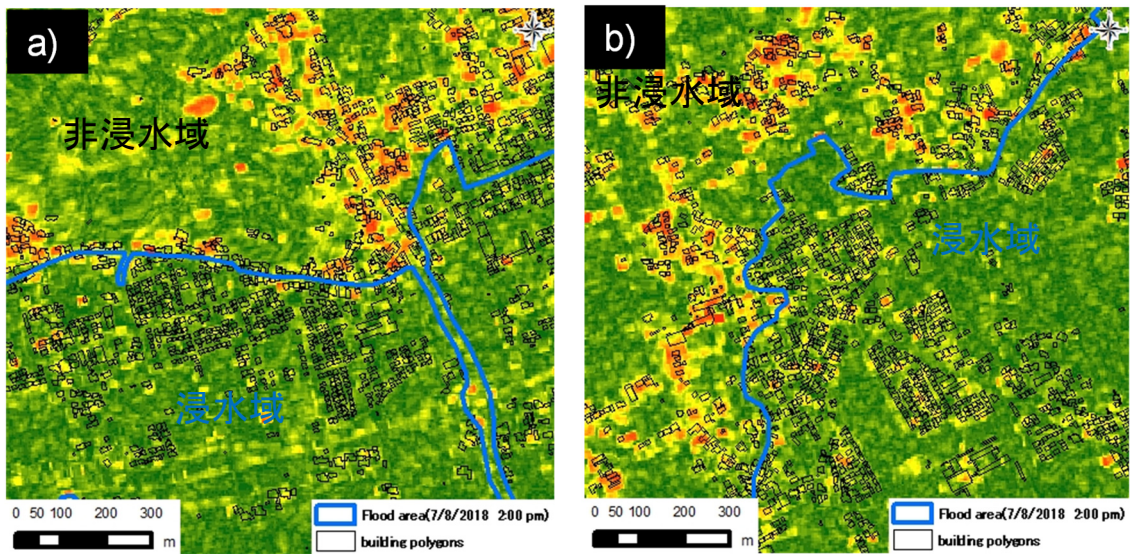


図 2.39 浸水域と非浸水域の建物立地個所のコヒーレンスの比較

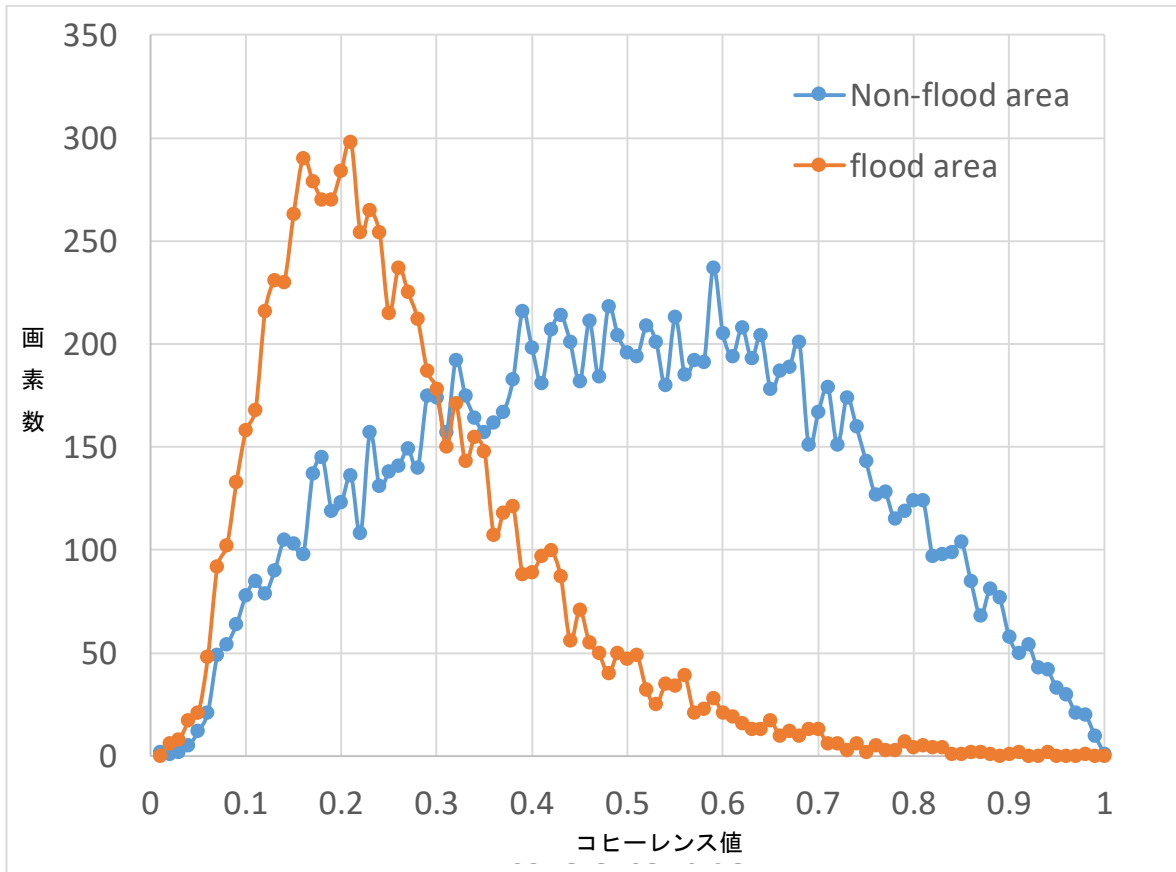


図 2.40 浸水域と非浸水域の建物ポリゴンによるコヒーレンスの平均値

### 2.3.8. コヒーレンス値を用いた建物位置の特定手法の開発

国土地理院の目視判読結果より建物データに浸水域および非浸水域の属性を付与し、建物ごとにコヒーレンス値を集計することで浸水の有無に伴うコヒーレンス特性を調査した。ここでは、コヒーレンス値に閾値を設定することで建物ごとに浸水の有無を評価した。なお、閾値は抽出率（目視判読の推定浸水範囲の建物が衛星解析により浸水と判定している割合）と正答率（衛星解析が浸水と判定している建物の内、目視判読が浸水である建物割合）により決定した。対象範囲内におけるコヒーレンス値を用いた浸水建物の判別結果を表 2.7 に示す。また、抽出率および正答率とコヒーレンス値の関係を図 2.41 に示す。

表 2.7 対象範囲の浸水建物判別結果（画素数）

		衛星解析	
		浸水	非浸水
目視判読	浸水	(A) 5,178	(B) 2,690
	非浸水	(C) 2,605	(D) 10,479

抽出率 (%) :  $A / (A + B) * 100$

正答率 (%) :  $A / (A + C) * 100$

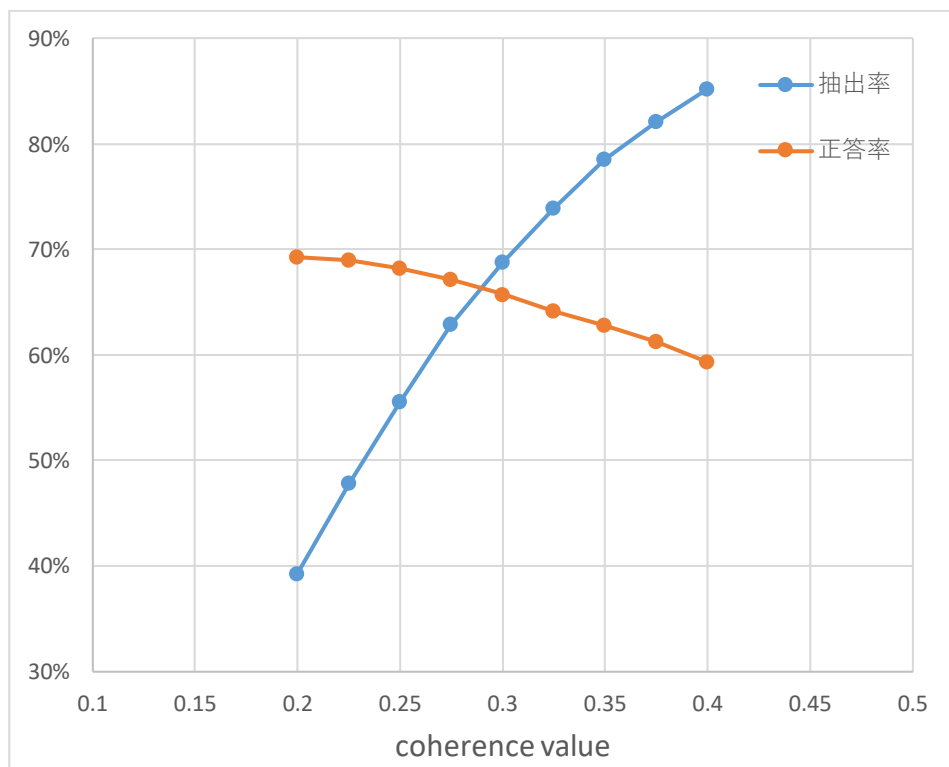


図 2.41 閾値の検討

閾値を抽出率と正答率が交差する 0.2875 に設定し、浸水した建物を抽出した結果を図 2.42、拡大図を図 2.43 に示す。青く表示されている建物が浸水と判定された建物であり、灰色で表示されている建物が非浸水と判定された建物である。これらと比較すると濃い青色で囲まれる空中写真の判読による浸水域とコヒーレンス値により判定された建物がおおよそ一致していることがわかる。一方で非浸水域に誤抽出した建物も点在することがわかる。このことから建物内のコヒーレンス値を用いることによって大凡の浸水の有無を判定することの可能性が明らかになった。

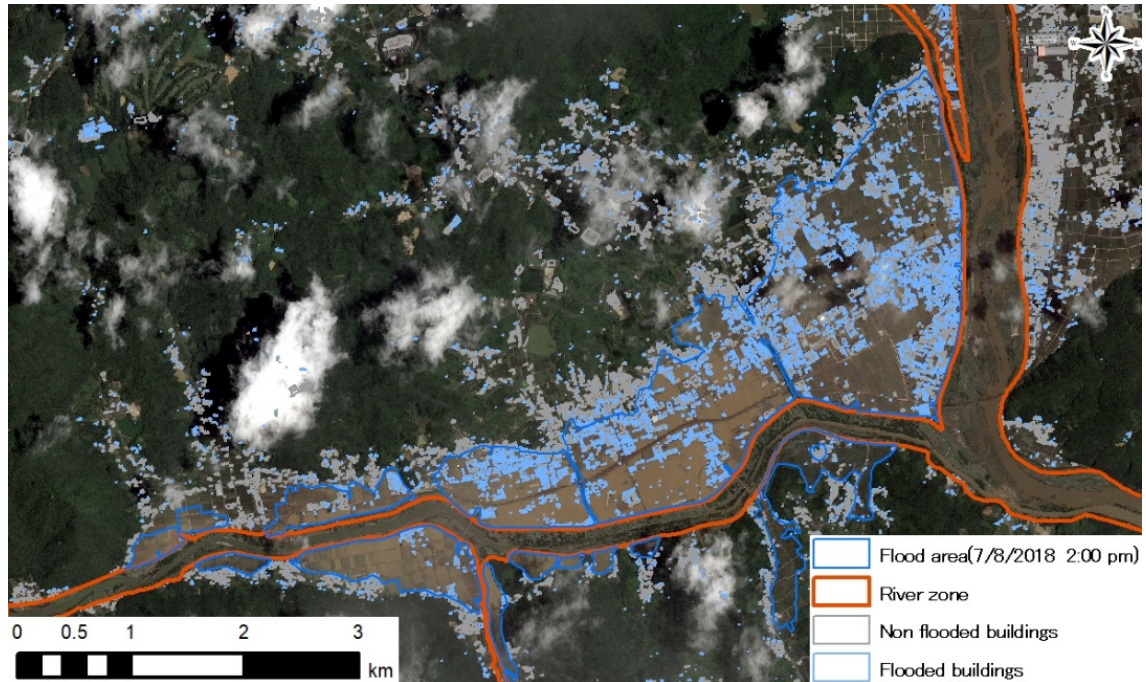


図 2.42 コヒーレンス解析による浸水結果（背景：光学衛星画像）

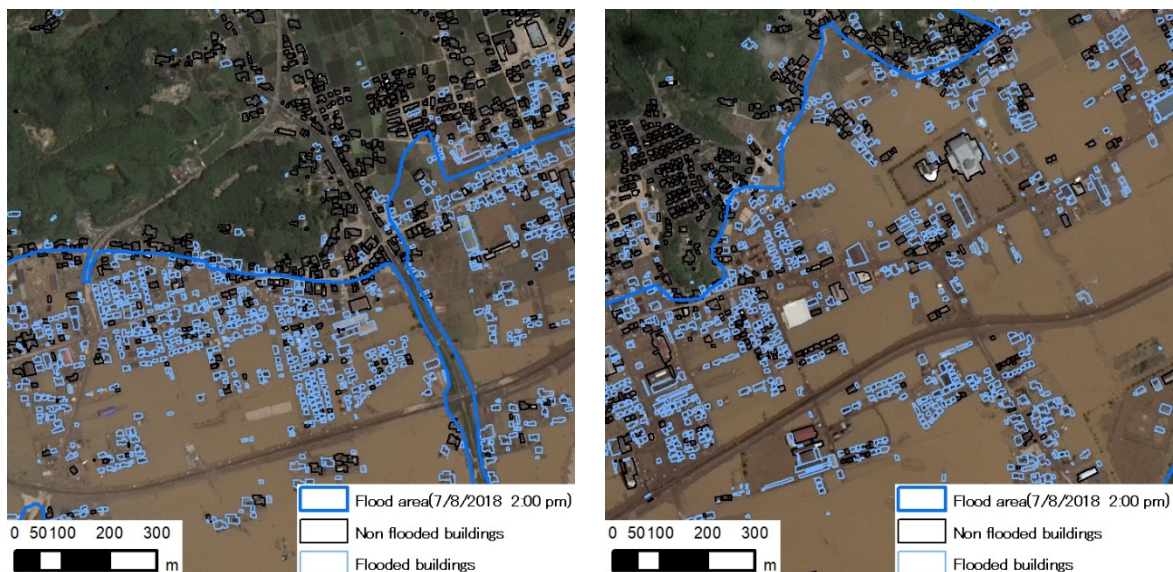


図 2.43 コヒーレンス解析による判定結果の拡大図（背景：光学衛星画像）

これらの結果から災害前後の SAR 画像による後方散乱係数による浸水域の抽出結果に対して、空間情報を用いた補正や空間処理の補正、コヒーレンス値による建物の浸水の有無を判定した結果を図 2.44 に示す。濃い青線で囲まれている領域と水色で示されている領域がほぼ一致していることがわかる。

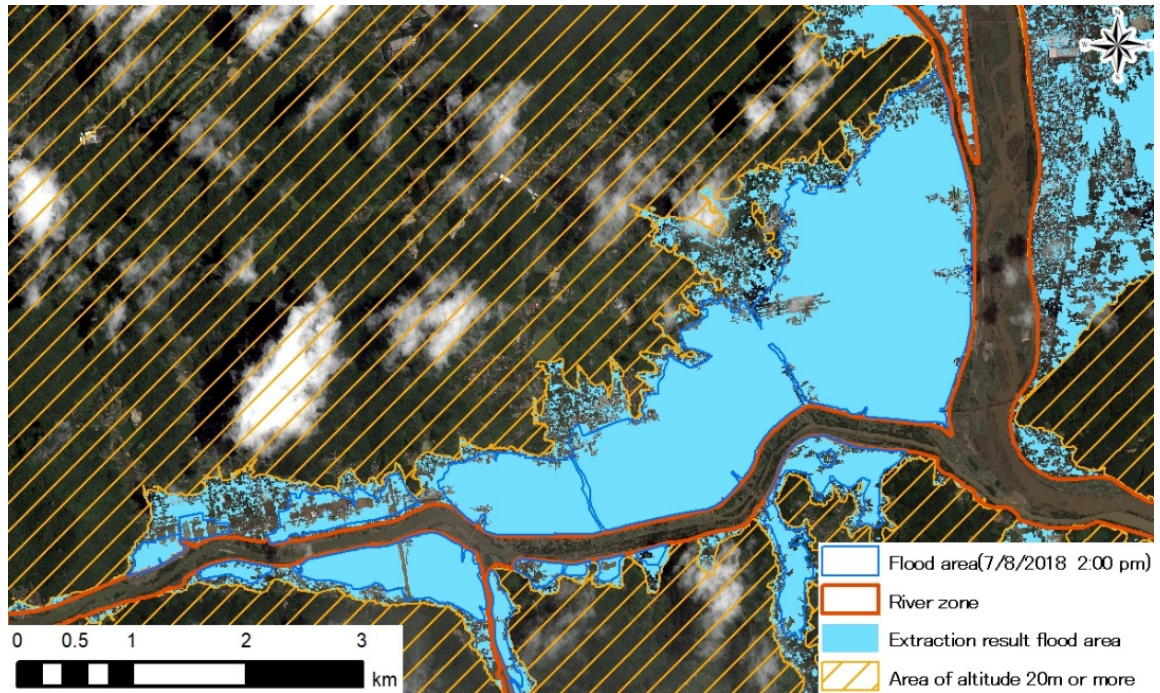


図 2.44 浸水域抽出結果（コヒーレンス建物補正）

各改善手法の適用別の精度評価結果を表 2.8 に示す。結果からして、各改善手法の抽出率と正答率から空間情報を用いた補正あるいは空間処理の補正を適用することで抽出率、正答率の向上を確認することができた。ただし、大幅に抽出率が向上する浸水域抽出結果の穴埋め補正においては、くぼ地などがある場合は過抽出の補正となってしまう可能性があるため、適用に注意する必要がある。また、正答率は河川情報および地形情報を用いて除外することで大幅に向上するが標高データにおいては地域特性を考慮し、設定する必要がある。また、建物補正として災害前後の 2 時期間のコヒーレンス値を建物ポリゴン内の平均値を求めることで抽出率、正答率ともに 67% 程度の抽出率、正答率で抽出された。コヒーレンス値を用いて建物の浸水の有無を判定し、補正を施した浸水域抽出結果から、強度情報の差分解析により得られた浸水域抽出結果とマージすることで抽出率は 2% 程度向上し、その効果を把握できた。また、今回用いた SAR 衛星画像は L バンド帯の波長であるが、他の C バンドや X バンド帯のマイクロ波により観測されたコヒーレンス画像を用いる場合は、留意が必要である。なお、一般に波長が短い X, C バンドは地表面の凹凸の変化に影響されやすく、干渉性が低いことから本手法の適用は困難であることが推定される。

これらから従来、災害後の後方散乱係数画像や災害前後の後方散乱係数の差分による抽出手法より、本項で用いた補正および改善手法の方が高い精度で浸水域が抽出することが可能であることがわかった。このことは災害直後の災害対応の立案に資する災害情報の提供が衛星画像および地理空間情報より可能となったことを示されたと考えられる。

表 2.8 浸水域の精度評価

	抽出率	正答率
災害前後の SAR 衛星の差分処理	79.0%	33.7%
山城, 河川水域の除外	79.6%	65.6%
山城, 河川水域の除外, 建築物の立地領域の補正	80.9%	65.4%
山城, 河川水域の除外, 空間処理	91.4%	67.3%
山城, 河川水域の除外, 空間処理, 建築物の立地領域の補正	96.2%	68.3%



## 2.4. 中分解能光学・SAR 衛星画像データによる津波被害域の抽出の評価

本項では中分解能衛星画像を用いた津波被害域の抽出手法について検討した。ここで用いる衛星画像はフリーに入手可能であり、観測後は準リアルタイムにダウンロードが可能となるデータである。また、中分解能衛星画像に分類されるため高精細な評価・抽出は困難であるが、比較的広範囲の観測が可能である。そのため、衛星の観測タイミングが災害直後であれば、災害対応の決定のための被害域の概略調査に適していると考えられる。そこで本項では津波被害の概略調査の適用性の検討として中分解能衛星画像の光学・SAR 衛星画像の津波被害域の抽出手法について検討した。

### 2.4.1. 使用データ

本研究では、観測後準リアルタイムにフリーに入手が可能である光学衛星の Landsat-8 衛星による災害前後に観測されたマルチスペクトル観測情報と、C バンドの波長特性をもつ SAR 衛星の Sentinel-1 衛星による災害前後の観測画像を使用した(表 2.9, 図 2.45～図 2.48 参照)。Sentinel-1 衛星画像は Copernicus Open Access Hub から提供され、Landsat-8 衛星画像は U.S. Geological Survey(USGS)から提供された。Sentinel-1 衛星画像は回帰日数が 12 日、観測モードは IWS (Interfero-metric Wide Swath)モードで観測され、観測方向に並行するレンジ方向に 5m、軌道方向に並行するアジマス方向に 20m の分解能を有する。Landsat-8 衛星画像は回帰日数が 16 日であり、Sentinel-2 と同様に可視光域、近赤外域、短波長赤外域のマルチスペクトルデータであり、本研究で使用した可視光域・近赤外域の波長帯で 30m×30m の分解能を有する。標高データは国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構が公開する分解能 30m の ALOS 全球数値地表モデル情報(AW3D30)[77]を使用した。これらにより、アナク・クラカタウ島の噴火前後による山体崩壊により発生した津波の周辺沿岸域の津波被害領域の抽出については、Landsat-8 および Sentinel-1 衛星画像を用いた。また、津波被害域の抽出結果の精度評価のため、Copernicus が公開する災害前後の高分解能衛星画像を用いた目視判読結果を参照した(図 2.49 参照) [78]。

表 2.9 使用衛星データ

衛星	分解能	観測日(災害前/後)
Landsat-8(光学)	30 m × 30 m	2014/12/15(前)
		2018/10/17(前)
		2018/12/20(前)
		2019/01/05(後)
		2019/02/06(後)
		2019/02/22(後)
Sentinel-1(SAR)	5 m × 20 m	2018/12/19(前)
		2018/12/31(後)

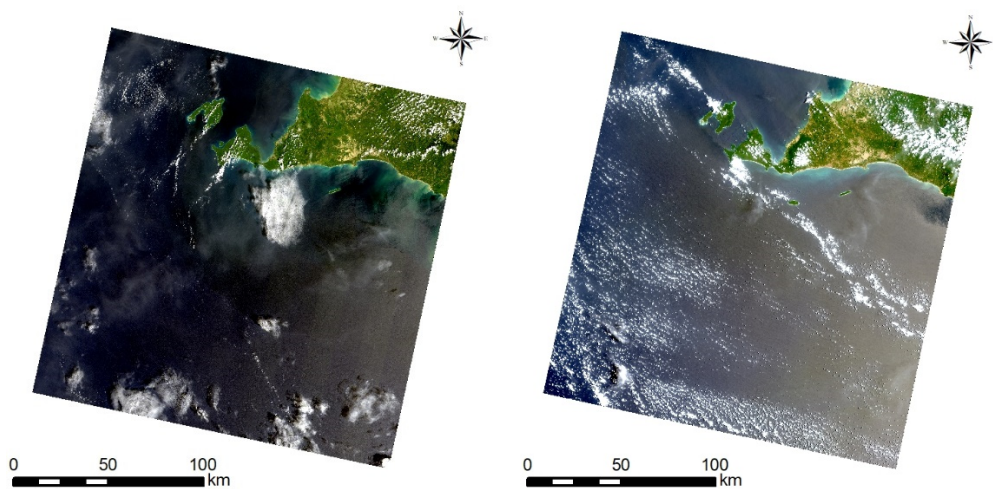


図 2.45 Landsat-8 衛星データ  
 (左 : 2014/12/15 (災害前) 右 : 2018/10/17 (災害前))

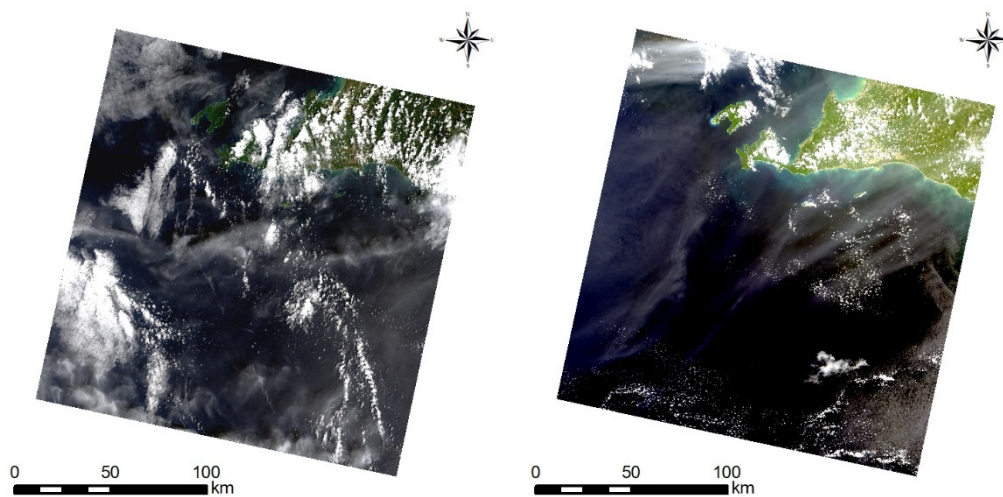


図 2.46 Landsat-8 衛星データ  
 (左 : 2018/12/20 (災害前) 右 : 2019/1/5 (災害後))

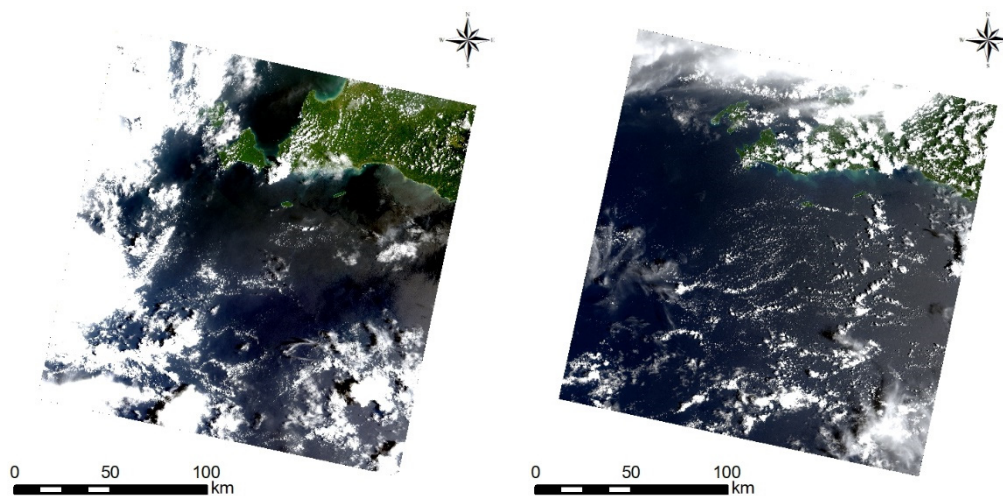


図 2.47 Landsat-8 衛星データ  
 (左 : 2019/2/6 (災害後) 右 : 2019/2/22 (災害後))

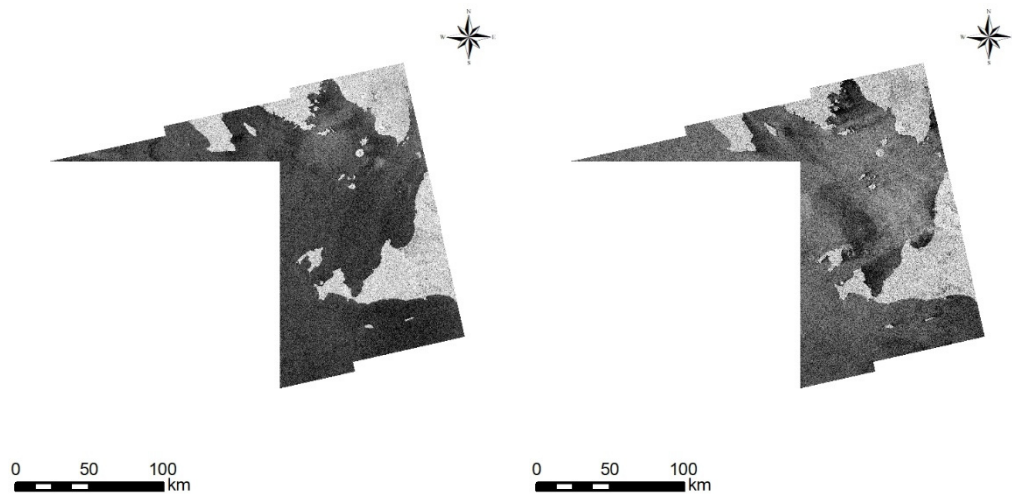


図 2.48 Sentinel-1 衛星データ  
(左 : 2018/12/19 (災害前) 右 : 2018/12/31 (災害後))

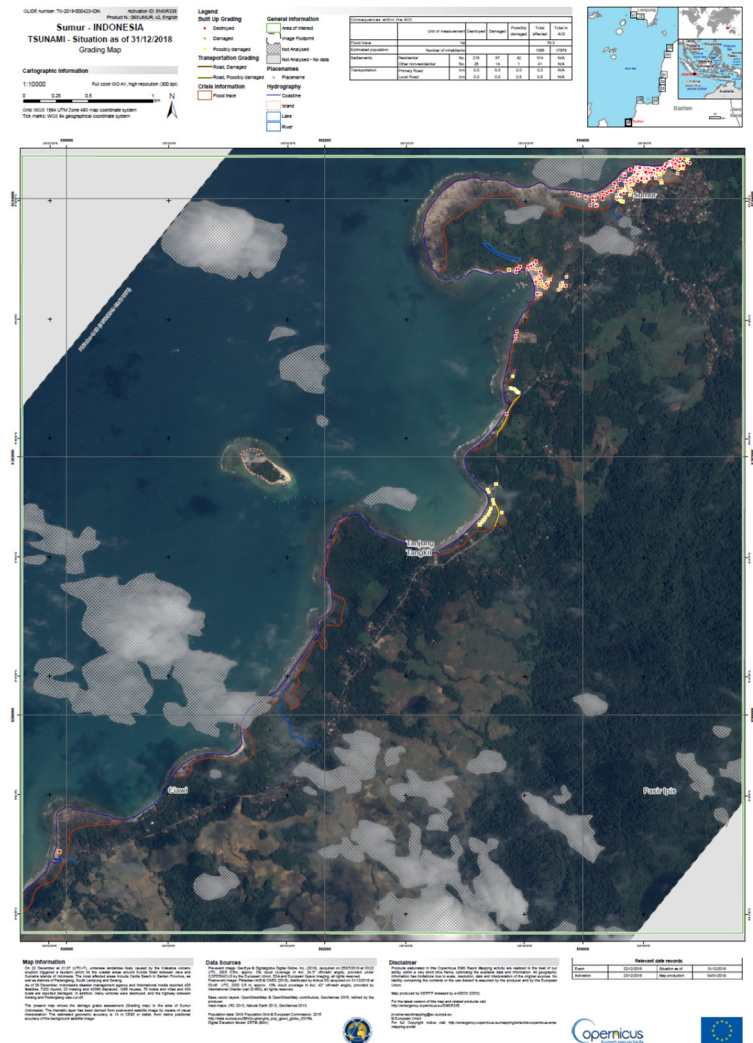
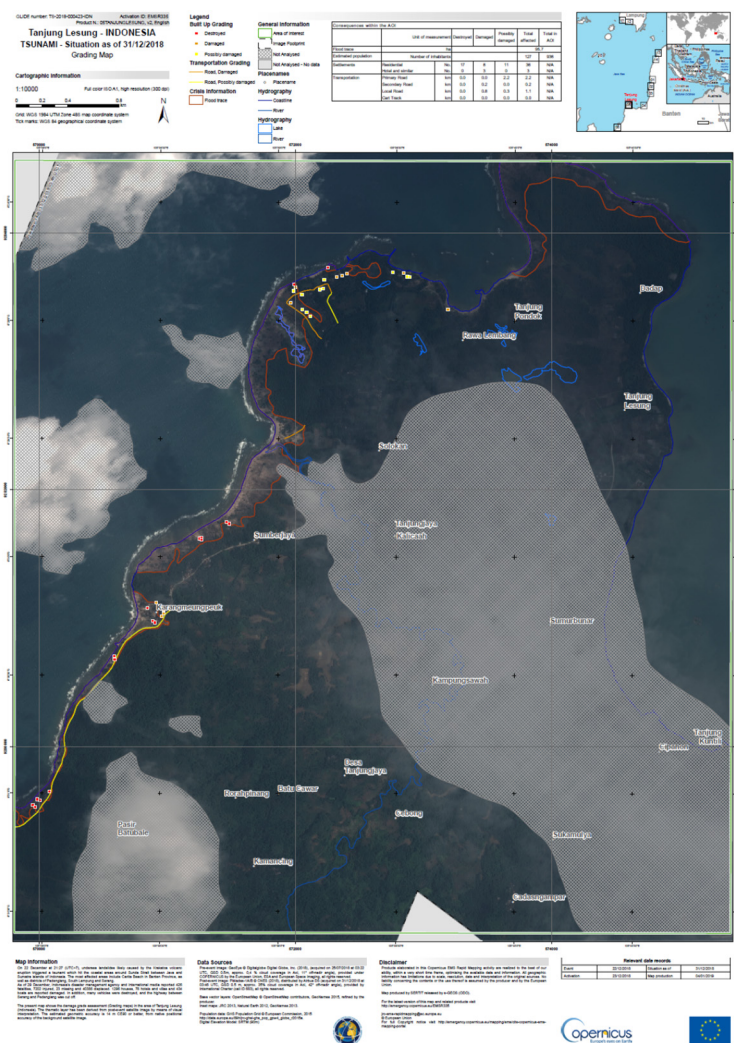


図 2.49 インドネシアの津波被害 (Copernicus) [77]  
 (左 : Tanjung Lesung 右 : Sumur)

#### 2.4.2. 光学衛星画像における衛星画像の前処理と正規化植生指標値の算出

一般に光学衛星画像データは大気による散乱・吸収の影響を除去する必要がある。また、太陽高度や入射角が異なる場合、地表面からの反射率は異なる。そのため、使用する衛星画像データについてまず前述の(4)の式を用いて DN 値から放射輝度( $L_\lambda$ )に変換し、(5)の式より反射率( $\rho$ )に変換した。

大気補正処理により地表面反射率変換後の可視光赤波長帯域と近赤外波長帯域の観測バンドを用いて一般に植生の健全度や枯れ具合の指標として利用される正規化植生指標値(NDVI 値)を(13)に示す式を用いて算出した。

$$NDVI = ( \rho_5 NIR - \rho_4 Red ) / ( \rho_5 NIR + \rho_4 Red ) \quad (13)$$

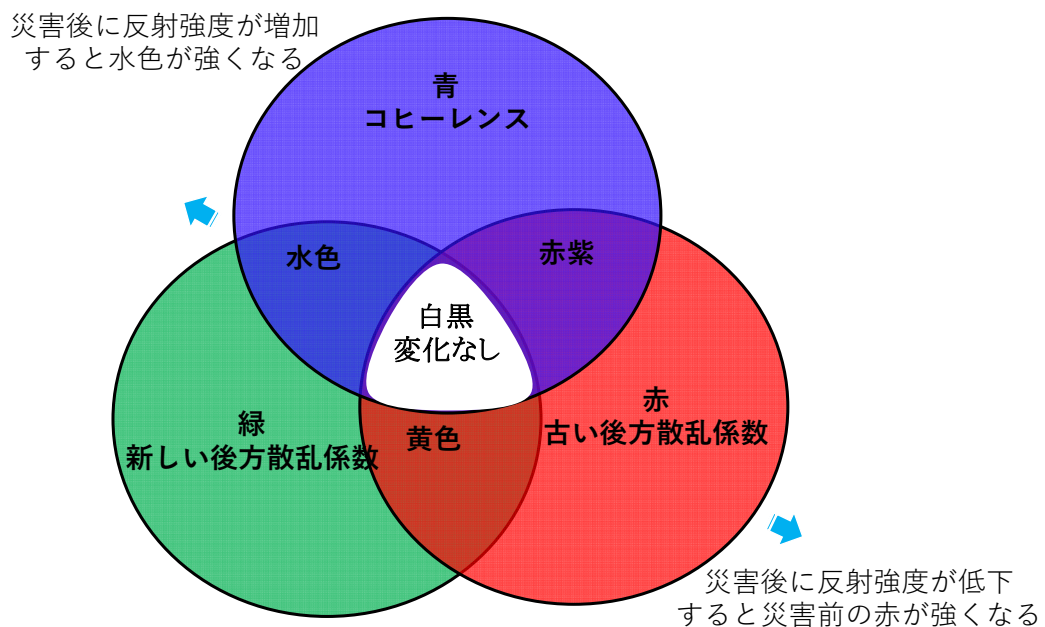
$\rho_n$ : n バンドの反射率

Red は可視光赤波長帯域、NIR は近赤外波長帯域の観測バンドを示す。Landsat-8 衛星画像の場合、NIR は band5、Red は band4 を指す。NDVI 値は-1 から+1 の値となり、+1 に近づくほど植生活性度が高い傾向を示す。

### 2.4.3. SAR 衛星画像における後方散乱係数画像および MTC 画像の生成

Sentinel-1 衛星画像の振幅情報を用いて局所入射角を考慮した後方散乱特性の基本物理量である後方散乱係数( $\sigma_0$ )に変換した。後方散乱係数は衛星から照射されたマイクロ波が地表面で散乱し、衛星に戻ってきた強度を示す。DN 値から後方散乱係数への変換式は(10),(11)の式を用いた。また、詳細な後方散乱係数の変化による判読を行うため、オルソ化により位置合わせを行った。

周辺沿岸域の津波被害域の抽出の検討として 2 時期の強度画像と 2 時期間の干渉度を示すコヒーレンス画像を用いて時点が古い観測画像を赤、新しい観測画像を緑、コヒーレンス画像を青に割り当てて合成し、MTC (Multi Temporal Coherence) 画像を作成した[79]。災害後に反射強度が増加すると緑色が濃くなり、低下すると赤色が濃く表示される(図 2.50 参照)。コヒーレンス画像を合成しているため、比較的小規模な地表面の変化を把握することが可能である。



- R : 古い後方散乱係数画像
- G : 新しい後方散乱係数画像
- B : コヒーレンス画像

図 2.50 MTC 画像のカラー合成

#### 2.4.4. 品質評価データを用いた雲箇所の補正

災害直前・直後に観測された Landsat-8 衛星画像は、被雲のため解析・抽出が困難であったため、観測時期が同等で被雲が少ない画像を用いて補正した。Landsat-8 衛星画像プロダクトには品質評価を目的として、ピクセル毎に雲や雲影など領域の評価データが含まれている[80]。それぞれの観測データにおいて品質評価データから、表 2.10 に示される雲の信頼性が中および高、雲による影が高とされるピクセルデータを抽出した。例としてトゥルーカラー画像と品質評価画像を図 2.51, 図 2.52 に示す。この領域を災害直前・直後の観測画像を基本として、被雲および被雲による影領域を補正することで災害前、災害後の光学衛星画像データとした。なお、いずれの画像データでも被雲・雲影の領域は評価対象外とした。得られた災害前後の補正データから災害前、災害後の NDVI 画像を作成した。なお、土地被覆情報から未被害かつ乾燥林 2 次林を対象として NDVI 値を補正した[81]。図 2.53, 図 2.54 から比較的高い NDVI 値が分布していることがわかる。また、全体域の NDVI 値の分布状況からは目視判読では津波被害域による変化を把握することは困難であった。

表 2.10 Landsat-8 の品質画像のピクセル値<sup>[80]</sup>

Attribute	Pixel Value
Cloud	2800, 2804, 2808, 2812, 6896, 6900, 6904, 6908
Cloud Confidence - Medium	2752, 2756, 2760, 2764, 3008, 3012, 3016, 3020, 3776, 3780, 3784, 3788, 6848, 6852, 6856, 6860, 7104, 7108, 7112, 7116, 7872, 7876, 7880, 7884
Cloud Confidence - High	2800, 2804, 2808, 2812, 6896, 6900, 6904, 6908
Cloud Shadow - High	2976, 2980, 2984, 2988, 3008, 3012, 3016, 3020, 7072, 7076, 7080, 7084, 7104, 7108, 7112, 7116

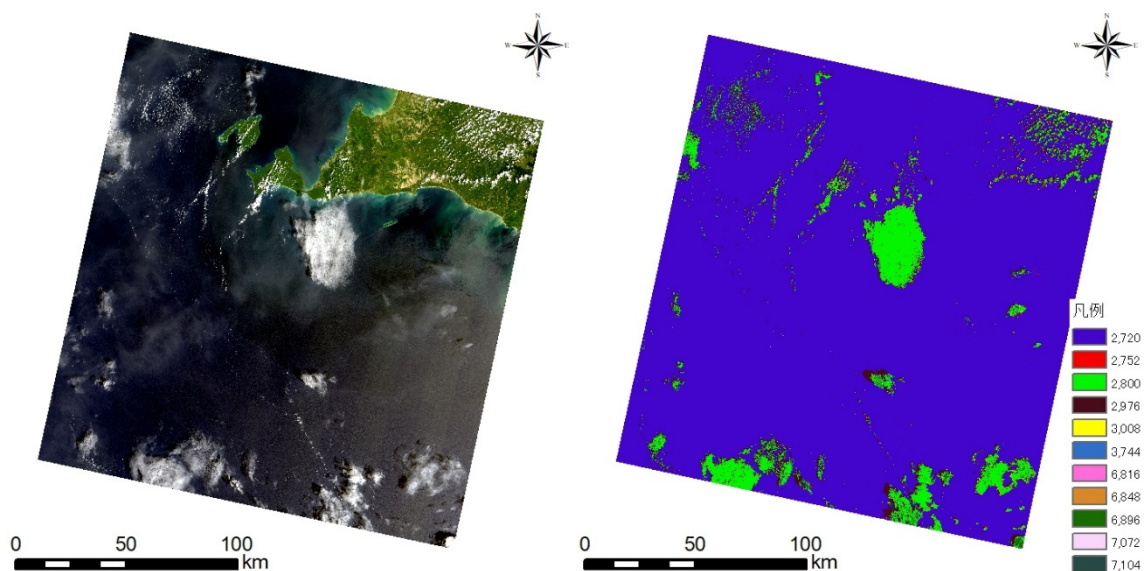


図 2.51 Landsat-8 衛星データ  
(左：トゥルーカラー画像 (2014/12/15) 右：品質補正画像 (2014/12/15))

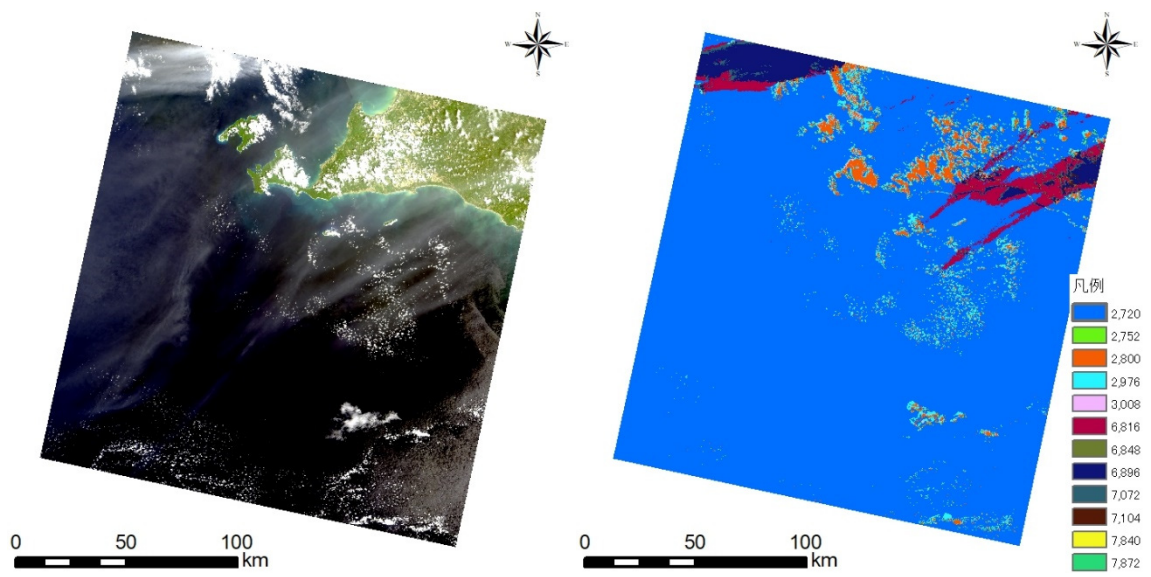


図 2.52 Landsat-8 衛星データ  
 (左：トゥルーカラー画像 (2019/1/5) 右：品質補正画像 (2019/1/5))

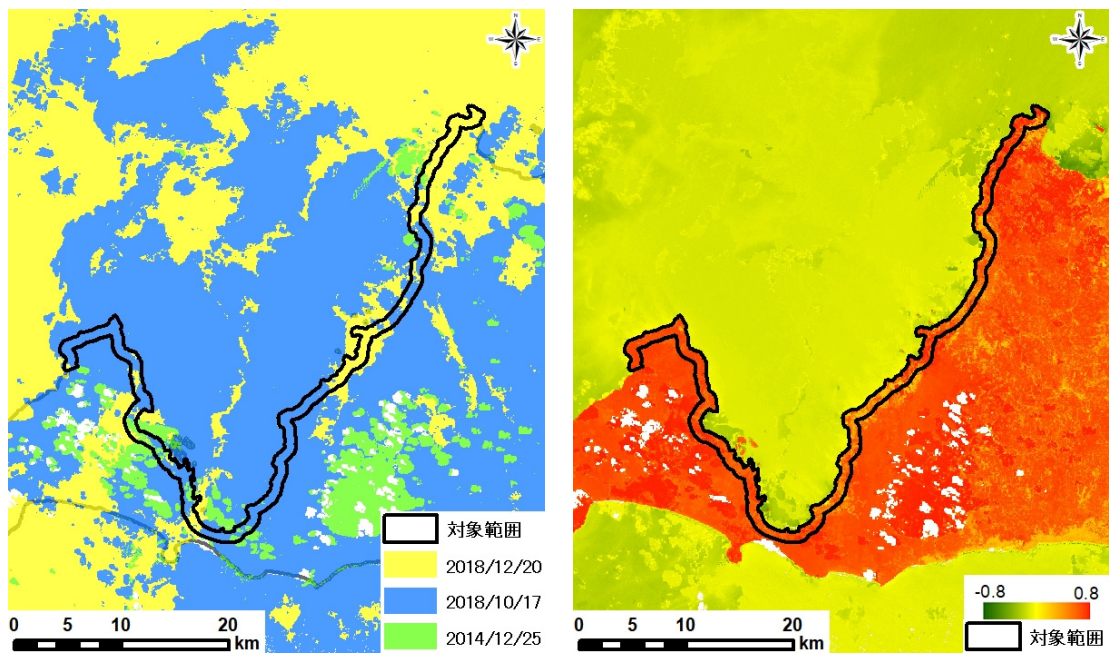


図 2.53 雲補正データ (災害前)  
 (左：雲補正分類画像 右：雲補正 NDVI 画像)



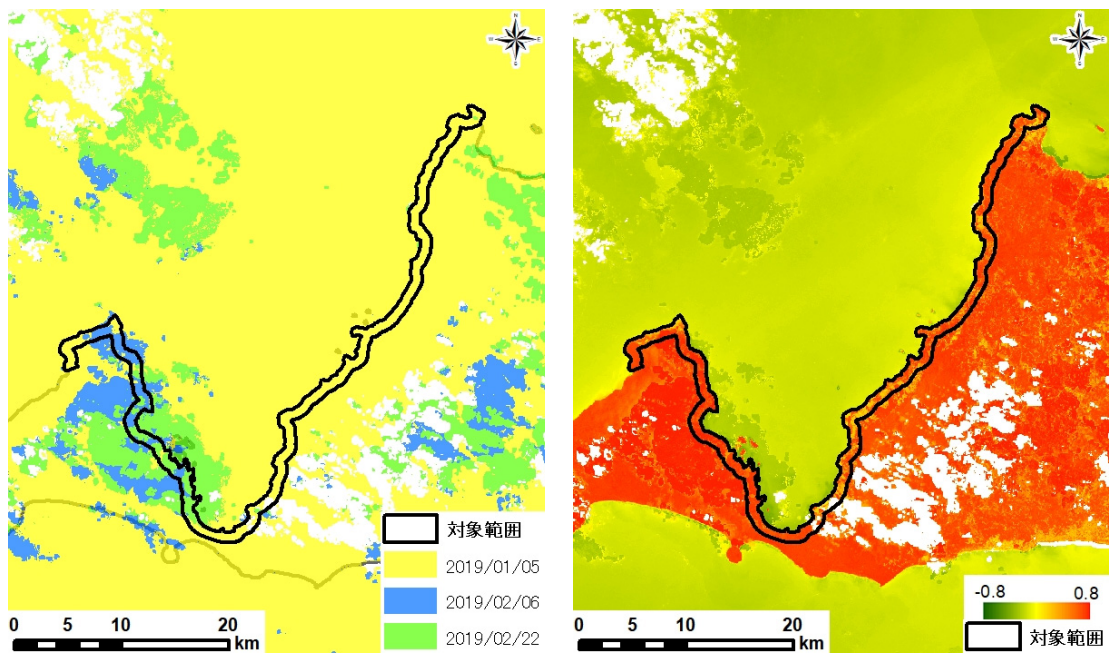


図 2.54 雲補正データ（災害後）  
（左：雲補正分類画像 右：雲補正 NDVI 画像）

#### 2.4.5. 対象範囲における NDVI 値の構成比と津波被害域の抽出

海岸線から内陸方向に 1,000m の範囲を対象範囲とし、災害前後の NDVI 値を集計することで変化過程を把握した。災害前後の NDVI 値のヒストグラムを図 2.55 に示す。なお、対象範囲に被雲による影響がある場合は災害前後の NDVI 値が対象範囲に対して占めている比率を構成比としてプロットした。災害前後で NDVI 値は大きく変わらないことが確認できる。また、比較的低い 0.4 以下の NDVI 値が災害前と比較し、災害後に増加していることがわかる。これらは津波による森林が倒伏，流出の影響を受けた理由と推測される。

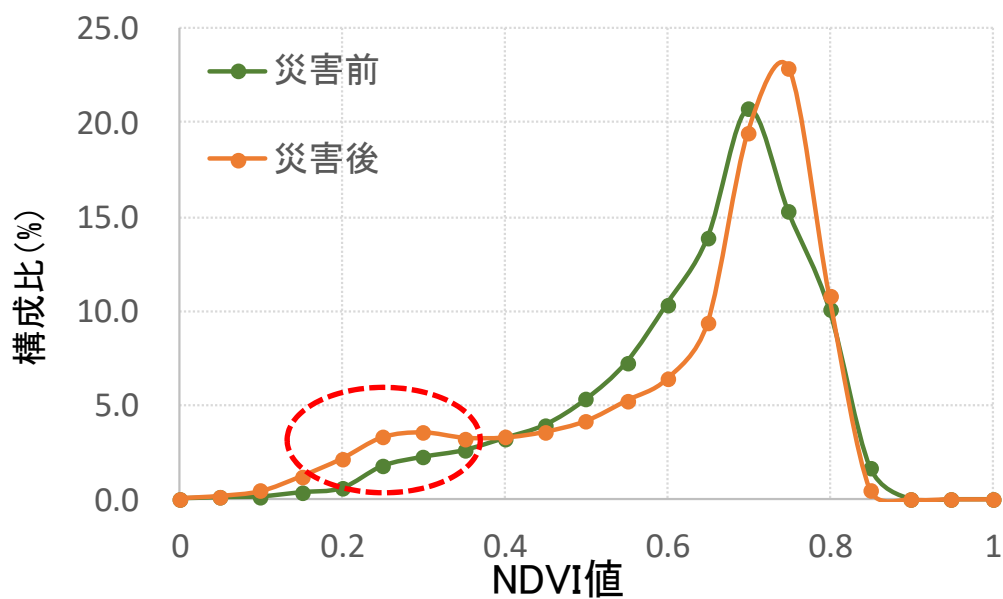


図 2.55 災害前後の NDVI 値のヒストグラム

災害前後で NDVI 値は大きく変わらないことが確認できる。また、比較的低い 0.4 以下の NDVI 値が災害前と比較し、災害後に増加していることがわかる。これらは津波による森林が倒伏、流出の影響を受けた理由と推測される。そこで(14)に示す簡易的な条件式を用いて津波被害域の抽出を試みた。

$$(NDVI_{\text{before}} > 0.5) \text{ and } (NDVI_{\text{after}} < 0.4) \quad (14)$$

(12)の条件式で得られた津波被害推定領域を図 2.56 に示す。対象範囲内において海岸線側に沿って抽出結果が分布していることから、抽出結果の妥当であることが推測される。

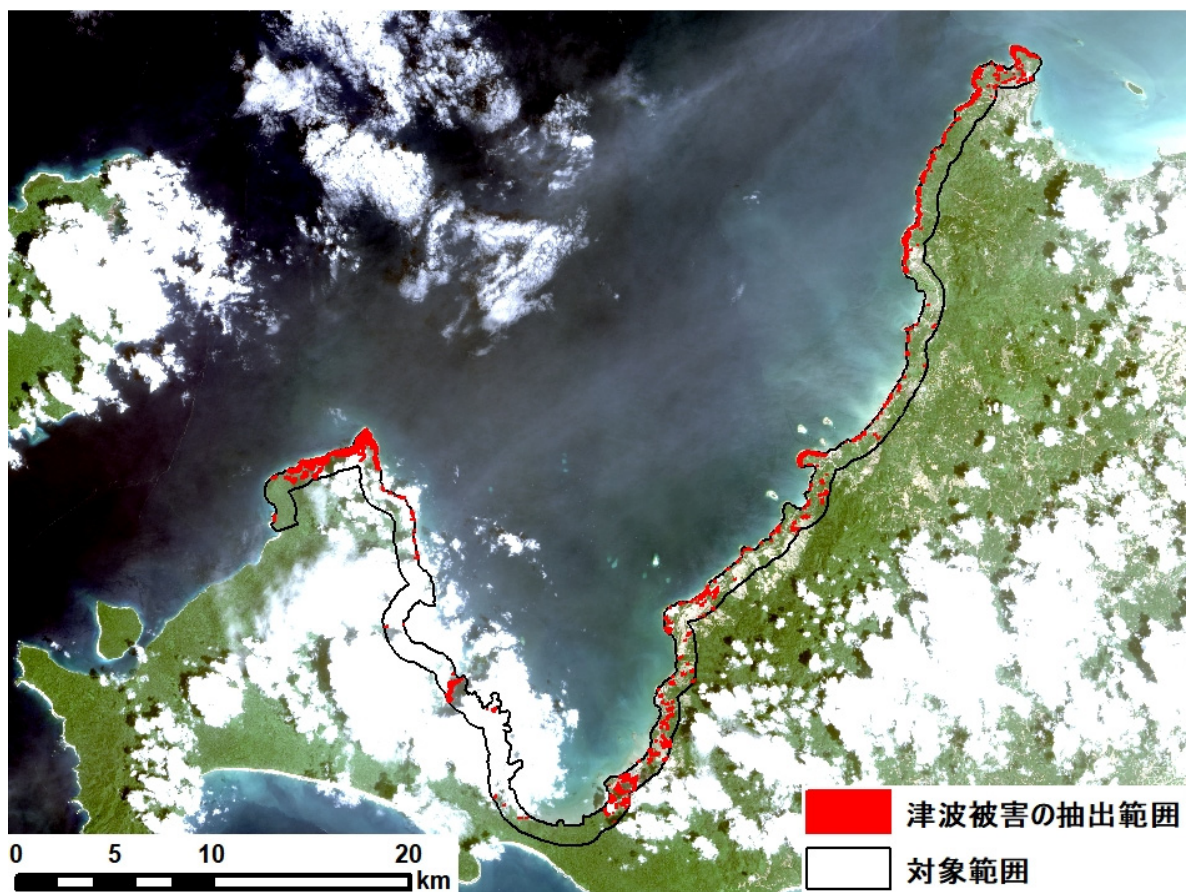


図 2.56 被害領域の抽出結果

## 2.4.6. 精度評価

精度評価においては、Copernicus による高分解能衛星画像データの目視判読結果（図 2.49 参照）[77]を参照し、抽出率（目視判読結果の内、衛星画像から抽出できた被害域の割合）と正答率（衛星画像抽出で被害域と判定した領域が目視判読結果で被害域であるかどうかを示す割合）を算出することで評価した。精度評価対象地は TANJUNGLESUNG 地区と SUMUR 地区とした。2 地区における津波被害域の抽出結果と目視判読結果の分布を図 2.57 に示す。津波による被害が比較的大きい領域は抽出できていることがわかる。ただし、津波が到達したと考えるにくい内陸においても誤抽出が確認された。また、SUMUR の領域において住宅密集地の津波被害域は未抽出であった。これは本手法が植生の活性度を示す NDVI 値を用いているため未抽出であったと推測される。2 地区のそれぞれの抽出率は TANJUNGLESUNG 地区で約 55%、SUMUR 地区で約 38%であった。正答率は TANJUNGLESUNG 地区で約 73%、SUMUR 地区で約 59%であった（表 2.11 参照）。抽出率は低い結果となったが、正答率が約 60%以上であることや海岸線に沿って抽出できていること、加えて比較的規模が大きい目視判読結果と抽出領域の形状がおおよそ同様のことから津波被害域の概要を把握することが可能であると考察された。また、Landsat-8 衛星画像は、フリーに観測後準リアルタイムに入手可能であることから、その他高分解能衛星画像が衛星軌道の制約により観測が困難な場合での補完での利用が想定できると考えられる。これらから本手法を適用することで災害対応時に迅速に把握が必要な概略調査の適用可能性が示されたと感ぜられる。おおよその津波被害域を把握することが可能であることが考察された。ただし、災害対応時には人的な被害の収集が最も優先されるため、住宅密集地における津波被害域の抽出手法を検討する必要がある。

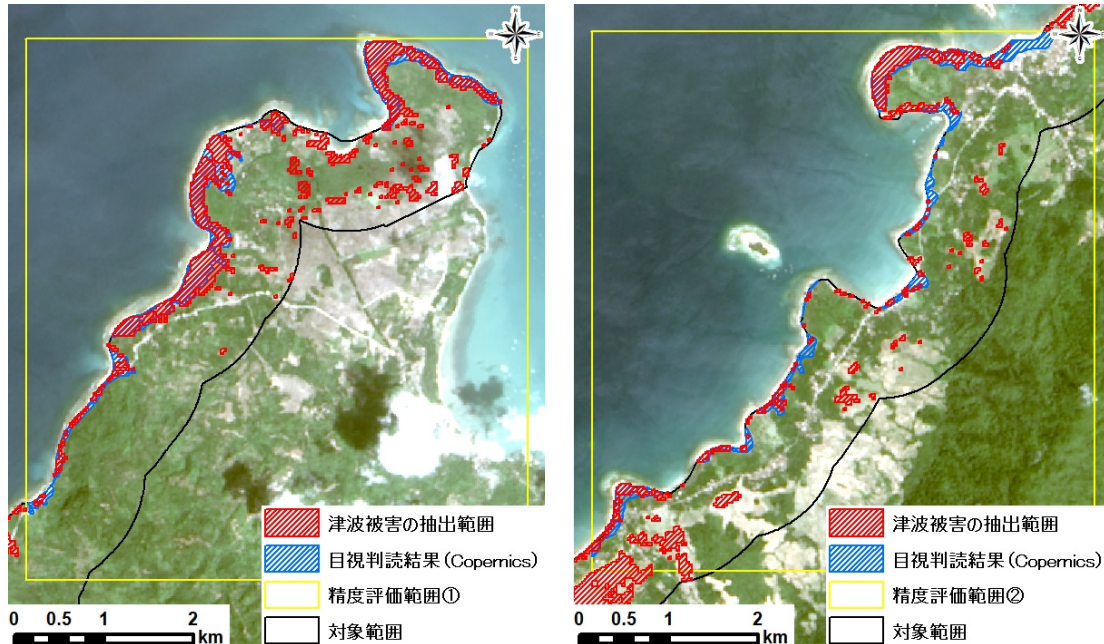


図 2.57 精度評価（左：TANJUNGLESUNG 右：SUMUR）

表 2.11 精度評価結果

	抽出率	正答率
TANJUNGLESUNG	55%	73%
SUMUR	38%	60%

#### 2.4.7. MTC 画像と目視判読結果の比較

災害前後の Sentinel-1 画像より作成した MTC 画像を用いて津波被害領域の判読特性を整理し、本災害における利用可能性について検討した。図 2.58 に作成した MTC 画像を示す。2 時期間において後方散乱係数の低下個所は赤色、上昇した個所が緑色となるように表示した。また、コヒーレンス値が比較的低い個所は黄色で表示されていることがわかる。図 2.60 の Landsat-8 画像との MTC 画を比較すると森林などが黄色、住宅密集地などが青や白色で表示されていることがわかる。NDVI 画像による抽出精度を評価した同様の地点の MTC 画像を図 2.59 に示す。目視判読結果による津波被害域において、MTC 画像は後方散乱係数の低下により薄い赤で表示されている個所はあるものの明瞭に判読することは困難であった。また、東京大学地震研究所による津波シミュレーション結果[82]によると周辺沿岸域において本災害で最も規模の大きい約 3m クラスの最大波高の津波が襲来した地区と報告されている。図 2.60 において NDVI 値により抽出した津波被害域と MTC 画像を比較した。本地区においては津波被害抽出域と MTC 画像で赤く表示される範囲がおおよそ一致していることがわかる。このことから図 2.59 の地区と比較し、比較的大きい津波が襲来したことにより、森林が流出し、地表面が滑らかになったため MTC 画像で把握可能であったと考えられる。また、多種ある SAR 衛星の中でも C バンドによる観測データは L バンドと比べ、波長が短いため詳細な地表面の変化に優れる特性を有するため、このような森林域における被害において優位性があると考察された。このようなことから観測後準リアルタイムに入手が可能な Sentinel-1 衛星画像を用いた MTC 画像による津波被害の抽出が災害対応の概要調査に利用できる可能性が示されたと考えられる。

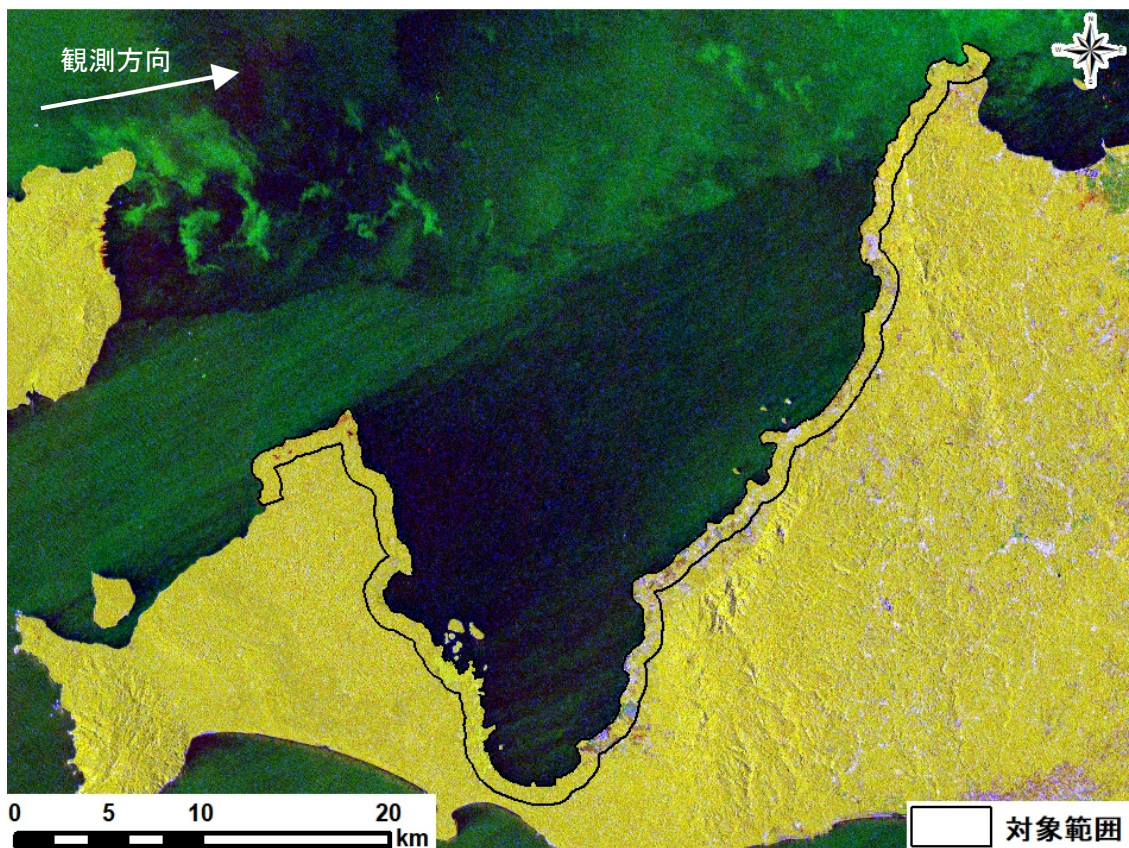


図 2.58 MTC 画像

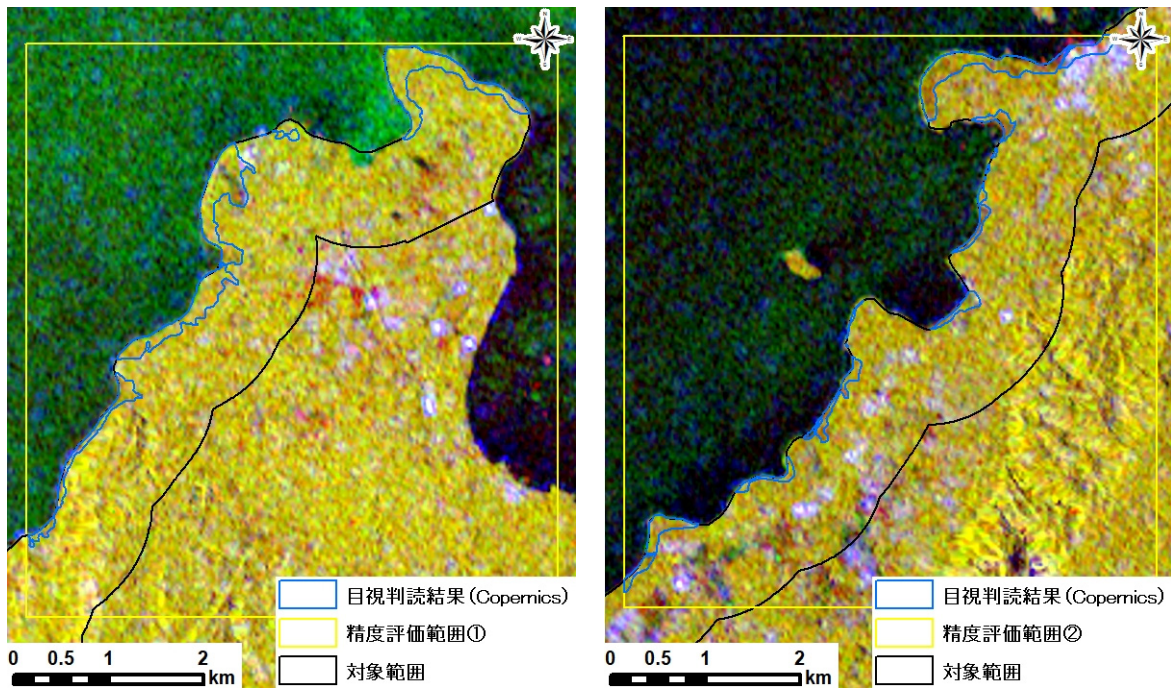


図 2.59 MTC 画像  
(左 : TANJUNGLESUNG 右 : SUMUR)

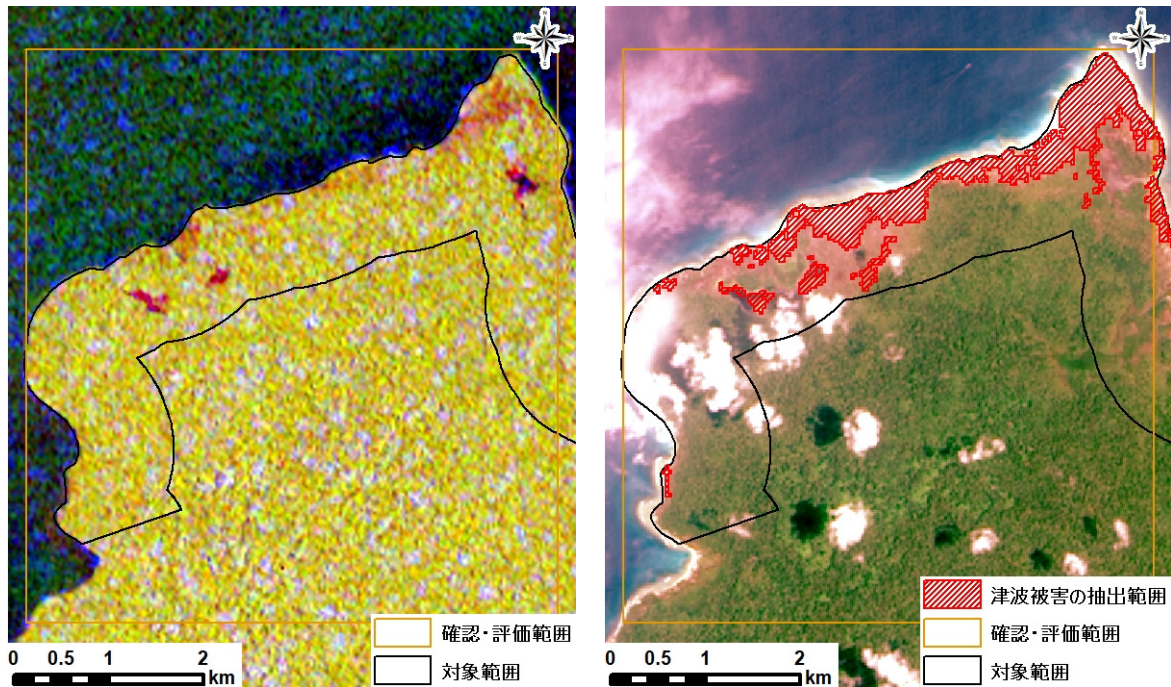


図 2.60 MTC 画像と Landsat-8 衛星画像の比較  
(左 : MTC 画像 右 : 浸水域抽出結果)

ここでは高頻度に観測され、観測後に準リアルタイムで公開され、フリーに入手可能な光学・SAR 衛星により観測された災害前後の衛星データセットを整備し、アナク・クラカタウ島の山体崩壊による地形変化および周辺環境の判読調査と周辺沿岸域の津波被害領域の抽出について検討した。Sentinel-2 衛星によるマルチスペクトル観測情報と Sentinel-1 衛星による SAR 画像情報、ALOS 全球数値地表モデル情報による地形データから山体崩壊による火口周辺の変化や海岸線の変化および周辺環境について効果的に把握できた。これらから、光学・SAR のそれぞれの特性を活用することで同様の災害における災害対応の概要調査に利用可能性が示唆されたと考察された。また、周辺沿岸域における津波被害において光学衛星の Landsat-8 衛星画像により観測時期を考慮して観測データを利用することで被雲や雲影領域をカバーし、災害直前直後データを作成することで、雨天が多い地域における利用が示されたと考えられる。加えて、これらから作成した災害前後のマルチスペクトル観測情報から NDVI 値を用いた津波被害域の抽出結果としては、目視判読結果と比較して約 50%の抽出精度であった。これらにより、沿岸域に森林が繁茂するインドネシアで津波被害域を効果的に抽出できる可能性が示されたと考えられる。ただし、災害対応時は人的な被害を迅速に把握する必要があるため、沿岸域に位置する住宅密集地における津波被害の抽出方法を検討する必要がある。また、MTC 画像を用いることで比較的、大規模な津波被害域における抽出可能性も示された。これらの検討結果から、即応性が求められる災害対応での利用可能性も示されたと考えられる。また、Sentinel-1 衛星、Sentinel-2 衛星はその他衛星と比較し、高頻度且つ定常的に観測されることから継続的な被害情報の収集の利用可能性が示されたと考えられる。加えて、本研究で使用した衛星画像は定常的に広範囲に観測されることから、復旧・復興フェーズでのモニタリングにおいても利用できると思われる。

## 2.5. 本章のまとめ

災害直後は政府・地方自治体による災害対応として災害の規模を早期に把握し、災害対応を立案するが、広域な被害の場合、その被害領域を把握することは非常に困難である。そのため多くの観測ツールを併用した詳細な災害規模や被害領域の把握が必要である。広範囲かつ同時多発的に発生する浸水被害に対しては、衛星画像を用いた被害領域の抽出はその他観測ツールに比べて有効であると考えられる。

まず、平成 27 年 9 月関東・東北豪雨および平成 30 年 7 月豪雨で被災した岡山県倉敷市真備町、平成 30 年 12 月クラカタウ火山活動による津波被害を対象に、災害直後フェーズにおける光学・SAR 衛星画像を用いた浸水域および浸水被害における沿岸域の被害域の抽出手法について検討した。下記に検討結果を示す。

- 平成 27 年 9 月関東・東北豪雨を対象に浸水域と数種の非浸水域の災害前後の地表面反射率の平均値を集計することにより、浸水域のスペクトラル特性を把握した。その結果、浸水域と非浸水域はバンド 2(緑)で顕著に違いがあることがわかった。また、バンド 1(青)、バンド 3(赤)の可視域の波長においても非浸水域より高い値となることがわかった。
- 従来、衛星画像の変化域の抽出においては災害前後画像の比較、差分を算出することでその変化域を災害被害域としていた。ここではアーカイブ画像がない場合を想定した災害後のみの光学衛星画像を用いた浸水域の抽出手法を検討した。平成 27 年 9 月関東・東北豪雨において被災した茨城県常総市による高分解能光学衛星画像でも見られたように一般的に砂漠化の指標として用いられる GSI 指標が浸水域に卓越していることが確認された。そのため、平成 30 年 7 月豪雨で被災した岡山県倉敷市真備町の浸水域に対しても分解能が 6m の SPOT-7 衛星画像を用いて抽出を行った。その結果、国土地理院の空中写真の目視判読により作成された推定浸水域と比較して抽出率、正答率ともに 70%程度の精度で抽出が可能であった。これらから大凡の浸水被害を抽出できる可能性が示された。さらに空間情報や地形情報を用いることで浸水域の精度の向上を確認できた。また、従来から課題であった建物域の未抽出個所が確認された。この課題の対応として街区ポリゴンによる街区ポリゴン内の建物面積と浸水抽出面積を求めることで街区ごとに浸水可能性を評価した。その結果、正答率は 70%以上の精度を維持しながら、抽出率は 85%程度に向上することを確認し、本手法の有効性を確認した。なお、GSI 値を算出して浸水域を抽出する手法は河川沿いに水田や泥などが存在する特性を持つ地域に関して、非常に有効であり、災害後のみの光学衛星画像を用いることで大凡の浸水域を把握可能であることは災害対応の利用にも十分に有効性があると考えられる。また、街区ポリゴンを用いた手法においては、その有効性を確認できたものの、街区ポリゴンのサイズや未整備地域においては街区の形状やその大きさが異なる場合においてもその適用性を把握する必要があると考えられる。
- 災害前後の SAR 画像を用いて浸水域の抽出手法を検討した。各改善手法の抽出率と正答率から空間情報を用いた補正あるいは空間処理の補正を適用することで抽出率、正答率の向上を確認することができた。ただし、大幅に抽出率が向上する浸水域抽出結果の補正においてはくぼ地などがある場合は過抽出の補正となってしまう可能性があるため、適用条件を整理し、使用する必要がある。また、正答率は河川情報および地形情報を用いて除外することで大幅に向上するが標高データにおいては地域特性を考慮し、設定する必要がある。また、建物立地領域の補正として、災害前後の 2 時期間のコヒーレンス値を建物ポリ

ゴン内の平均値を求めることで抽出率、正当率ともに 67%程度の抽出率、正当率で抽出された。これらを用いて強度情報の差分解析により得られた浸水域抽出結果とマージすることで抽出率は 2%程度向上し、その効果を把握できた。その結果、抽出率は 96%程度、正当率は 68%程度であったことから災害対応時の概要調査には利用が可能と考えられる。

- 光学衛星画像と SAR 衛星画像の併用手法に関して検討した。光学衛星画像と SAR 衛星画像の抽出結果を比較すると画像のみの解析では光学衛星画像の方が本事例においては精度が良いことがわかった。そのため、光学衛星が観測できれば、その利用が望ましいと考えられる。一方、SAR 衛星画像は悪天候や夜間でも観測可能であり、すなわち観測成功率は高いため、アーカイブ画像と災害後画像の災害前後の画像を利用して浸水域の抽出を行った。コヒーレンス値による建物補正あるいは、街区ポリゴンを用いた浸水面積と建物面積の補正方法を適用することで精度評価は向上すると考えられる。また、災害対応を行う政府・地方自治体の利用を踏まえると災害後の光学衛星画像による解析結果をベースとした方がより視覚的に被害状況を把握できることから、重ねて記載するが災害後に光学衛星画像が観測できれば、これを基本とした解析を行う方が最適と考えられる。また、緊急避難場所や避難所、道路線などの地理空間情報を重畳することにより、より災害対応現場で利用が容易、迅速かつ効果的な災害対応の立案に寄与できると考えられる。
- 次にフリーで入手が可能である空間分解能 20m 程度の政府系光学・SAR 衛星画像によるインドネシア国のアナク・クラカタウ火山の山体崩壊による津波の被害領域の抽出手法について検討した。災害前後の同季節に観測された各 3 シーン、計 6 シーンの光学衛星画像である Landsat-8 衛星による観測されたマルチスペクトル画像情報を用いて、災害直前・直後の画像情報をベースとして雲補正することにより、周辺沿岸域の津波被害領域の抽出手法を検討した。また、同季節による観測のため、NDVI 値に季節差は含むことは考えにくい、災害直前・直後の植生域を数か所サンプリングすることでモデル式を作成することで補正した。これらから災害前後 NDVI 値の差分値をとることで閾値を決定し、浸水域とした。その結果、Copernicus による災害後の光学衛星画像の目視判読結果と比較して、抽出率が 38%~55%、正当率は 59%~73%であった。Landsat-8 衛星はマルチスペクトル画像で分解能が 30m であるため、抽出率は低い結果となったが、海岸線沿いに抽出できていることから大凡の被害域の形状は把握することが可能であることが示された。ただし、建物被害域については未抽出である傾向が示された。また、Sentinel-1 衛星画像の強度情報と干渉解析結果から得られるコヒーレンス画像をカラー合成して得られる MTC 画像による浸水域の抽出においては、津波被害による後方散乱係数の低下およびコヒーレンス値の低いピクセル値を示す領域の傾向を示されたものの、明瞭に把握することは困難であった。また、津波による森林が流出した領域は明瞭に把握が可能であった。これらの検討結果から、即応性が求められる災害対応での利用可能性も示されたと考えられる。また、Sentinel-1 衛星、Landsat-8 衛星は定常的に観測されることから継続的な被害情報の収集の利用可能性が示されたと考えられる。加えて、本研究で使用した衛星画像は定常的に広範囲に観測されることから、復旧・復興フェーズでのモニタリングにおいても利用できると考えられる。



### 3. 復旧・復興フェーズにおける衛星画像を用いた津波被害域の調査

#### 3.1. 研究概要

現状の衛星画像による復旧・復興フェーズによる衛星画像の利用は確立されていない。一方で、内閣府による「復旧・復興ハンドブック」の被災状況などの把握の施策によると、復旧・復興の状況を継続的に把握し、タイムリーな施策を実施する必要があると記載されており、東日本大震災のような広域におよぶ被害においては、復旧・復興事業の進捗状況を定期的に適切に把握することが必要であると考えられる[53]。加えて、このような施策を効果的に支援するためには、広域かつ周期的に観測が可能な衛星リモートセンシングが有効であると考えられる。そのため、ここでは平時、災害直後の衛星画像と復旧・復興フェーズにおいて観測された衛星画像による時系列データセットを構築することにより、復旧・復興状況の継続的なモニタリング手法としての利用の可能性について検討した。さらに、被災した沿岸域の植生環境を対象として光学衛星画像のマルチスペクトル情報を利用することで継続的な復旧・復興状況の把握手法について検討した。これらの結果から、日本に加えて海外における復旧・復興モニタリングの利用について検討した [83,84]。

#### 3.2. 時系列データセットの構築

災害前から災害後 5 年後までの 5 時期の高分解能衛星画像より作成したパンシャープン画像と NDVI 画像を利用し、厳密な位置合わせを施した後、海岸林領域を示す空間情報を組み合わせた時系列データセットを構築した (図 3.1 参照)。

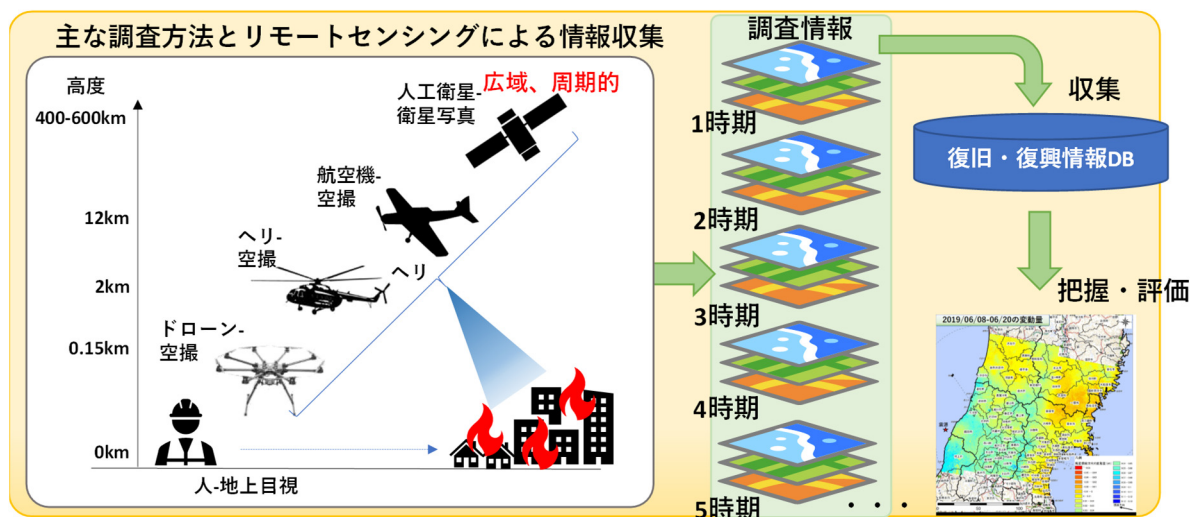


図 3.1 衛星画像による時系列把握のイメージ

### 3.2.1. 使用衛星データ

本研究では、高分解能衛星 GeoEye-1 および WorldView-2,3 による時系列的な観測画像を使用した（表 3.1 参照）。災害前の 1 時期と災害後 4 時期の計 5 時期とし、観測時期はほぼ同等の画像である。一般に光学衛星画像は大気による散乱・吸収の影響を除去する必要がある。また、太陽高度や入射角が異なる場合、地表面からの反射率は異なる。使用する衛星画像について DN 値から大気補正処理を施し、地表面反射率に変換した。大気補正処理手法は Richer R., et al.によって検討され、DLR-German Aero Space Center にて処理プログラムが提案されている ATCOR アルゴリズムを使用した[85]。使用画像を図 3.2 に示す。

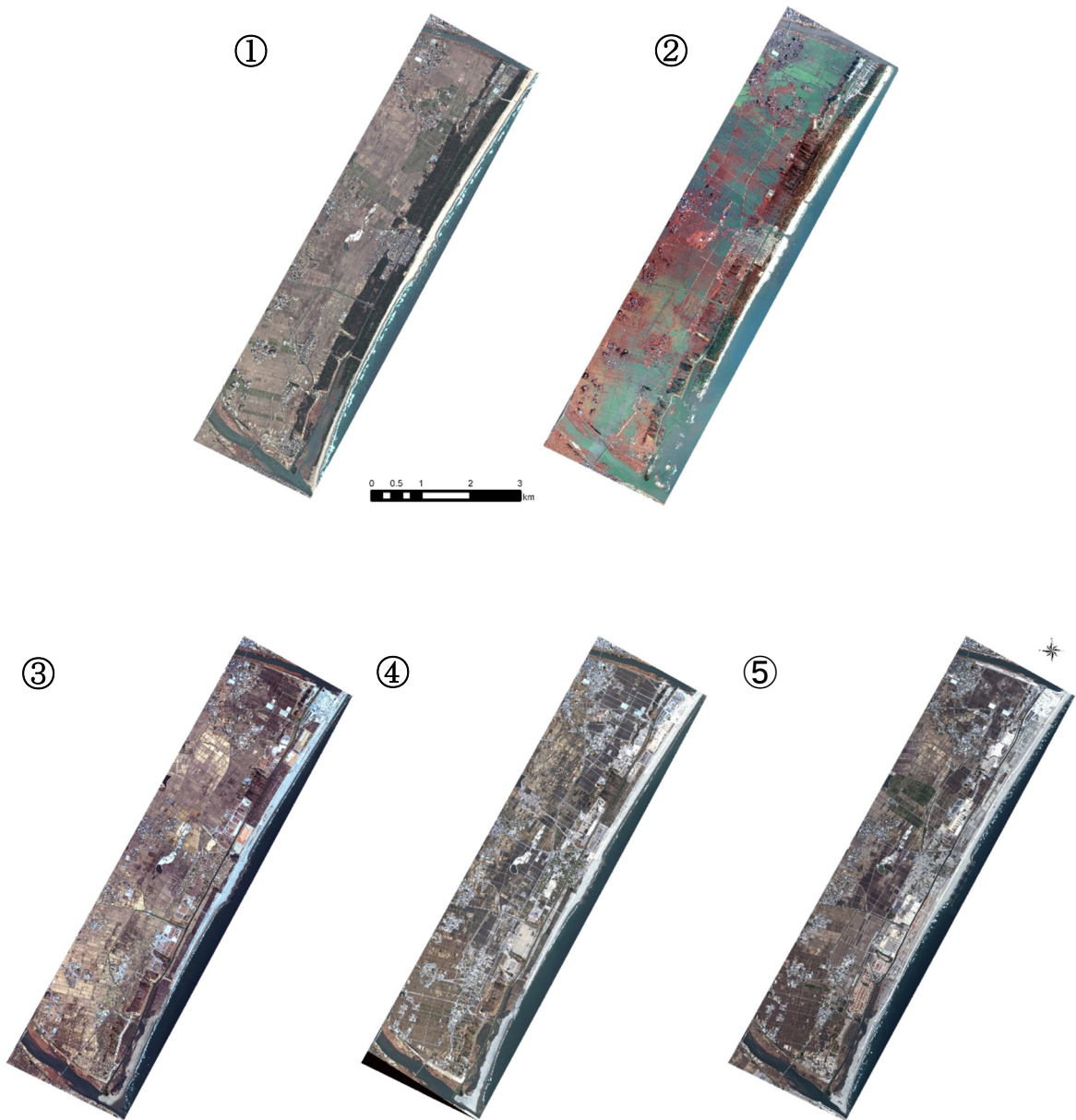


図 3.2 使用衛星データ

表 3.1 使用衛星データの諸元

No	衛星	分解能(マルチ/パンクロ)	観測日(災害前/後)
①	GeoEye-1	2.0m×2.0m/0.5m×0.5m	2010/4/4 (災害前)
②	GeoEye-1	2.0m×2.0m/0.5m×0.5m	2011/3/14 (災害直後)
③	GeoEye-1	2.0m×2.0m/0.5m×0.5m	2013/4/14 (災害2年後)
④	WorldView-2	2.0m×2.0m/0.5m×0.5m	2014/4/2 (災害3年後)
⑤	WorldView-3	1.2m×1.2m/0.3m×0.3m	2016/4/13 (災害5年後)

### 3.2.2. パンシャープン画像と正規化植生指標値画像の作成

本研究で使用する高分解能衛星画像データの高分解能な性能を持つ画像判読調査を活用するために、パンシャープン画像を作成した(図 3.3~図 3.7 参照)。なお、解像度は表-1 に示すパンクロマティックのサイズとした。これらを用いて画像判読により、海岸堤防や海岸林および復興道路を調査した。大気補正処理により地表面反射率変換後の可視光赤波長帯域と近赤外波長帯域の画素情報を用いて一般に植生の健全度や枯れ具合の指標として利用される正規化植生指標値 (NDVI 値) を (15), (16) に示す式を用いて算出した。

GeoEye-1 画像 :

$$NDVI = (\rho_4 \text{ Band4} - \rho_3 \text{ Band3}) / (\rho_4 \text{ Band4} + \rho_3 \text{ Band3}) \quad (15)$$

WorldView-2,3 画像 :

$$NDVI = (\rho_7 \text{ Band7} - \rho_5 \text{ Band5}) / (\rho_7 \text{ Band7} + \rho_5 \text{ Band5}) \quad (16)$$

GeoEye-1 画像については、Band3 は可視光赤波長帯域、Band4 は近赤外波長帯域の観測バンドを示す。WorldView-2,3 画像については、Band5 は可視光赤波長帯域、Band7 は近赤外波長帯域の観測バンドを示す。NDVI 値は-1 から+1 の値となり、+1 に近づくほど植生活性度が高い傾向を示す。 $\rho$  は ATCOR 手法による各バンドの反射率を示す。



図 3.3 パンシャープン画像と NDVI 画像 (2010/4/4 (災害前))

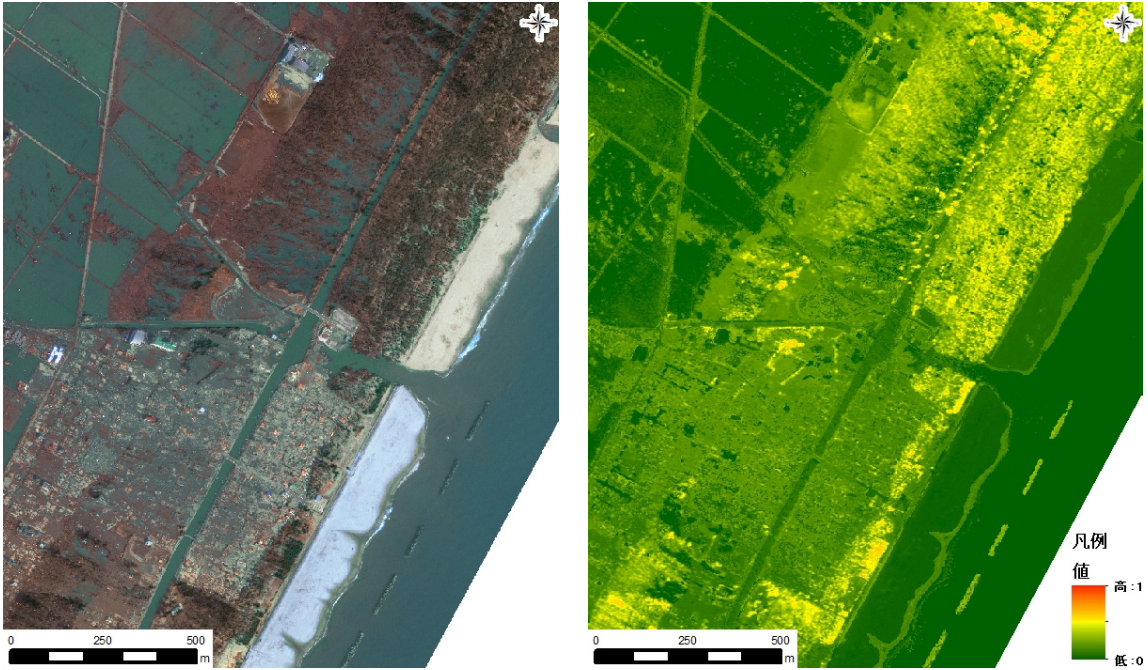


図 3.4 パンシャープン画像と NDVI 画像 (2011/3/14 (災害直後))

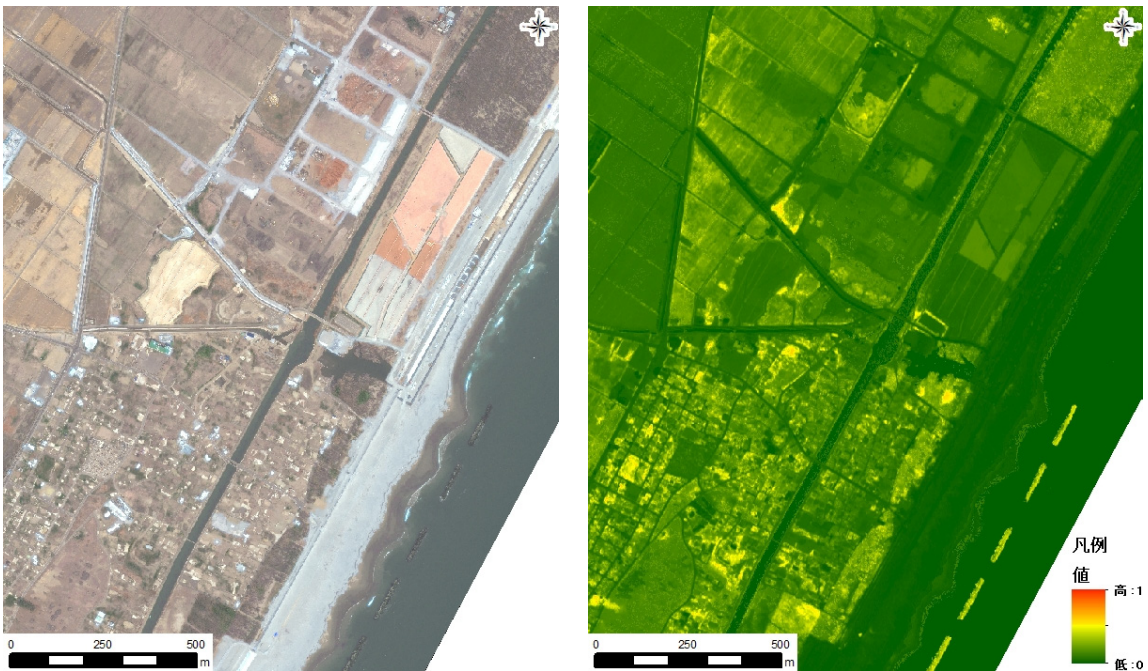


図 3.5 パンシャープン画像と NDVI 画像 (2013/4/14 (災害2年後))

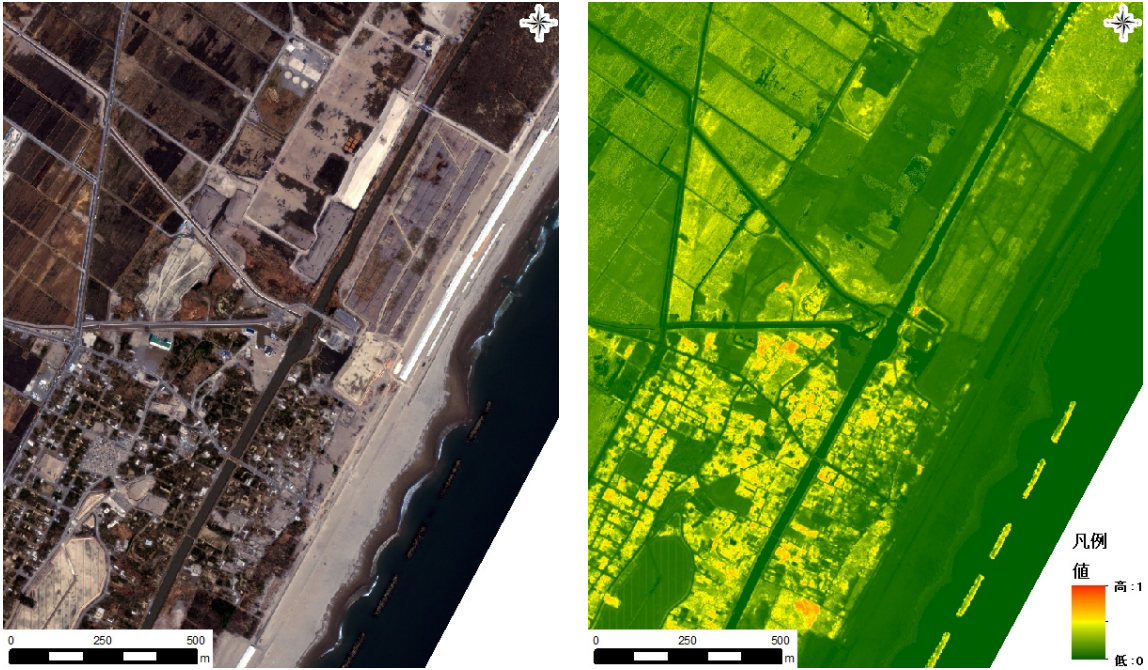


図 3.6 パンシャープン画像と NDVI 画像 (2014/4/2 (災害 3 年後))

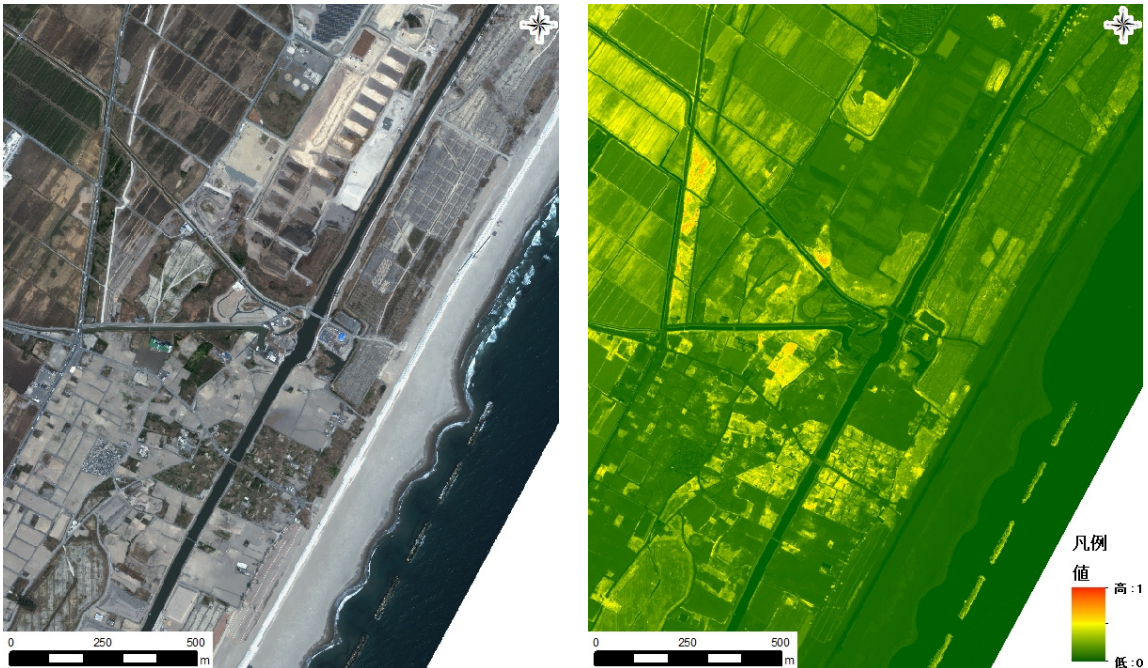


図 3.7 パンシャープン画像と NDVI 画像 (2016/4/13 (災害 5 年後))

### 3.2.3. 海岸林領域の抽出と空間情報への変換

災害前画像から沿岸域の海岸林領域を作成した。海岸林領域と災害前画像の重畳した図 3.8 から海岸林領域が正しく示されていることがわかる。また、図 3.9 の拡大図から海岸林が繁茂していない領域が、抽出されていないことから正しく抽出されていることがわかる。本研究では海岸林の領域を本図の通りとし、評価する。

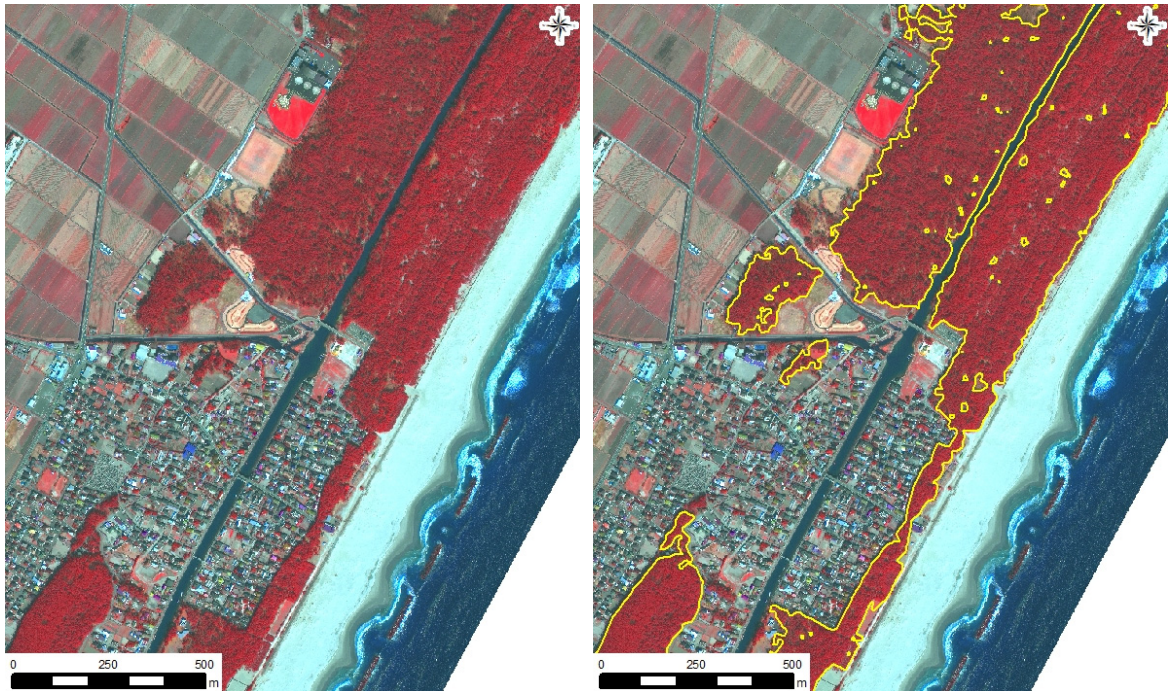


図 3.8 海岸林領域の抽出 (2010/4/4 (災害前))

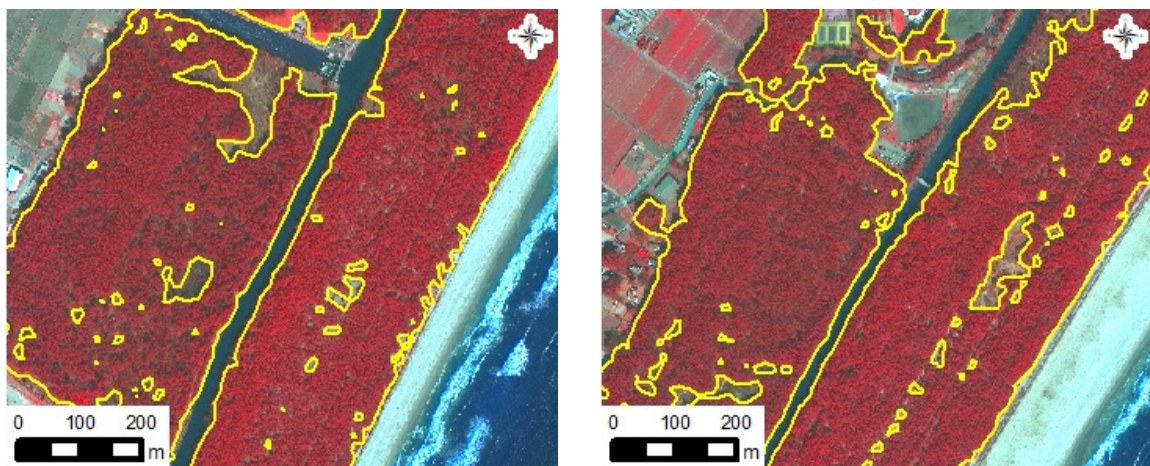


図 3.9 海岸林領域の抽出 (拡大図) (2010/4/4 (災害前))

### 3.3. 沿岸域の周辺インフラの変化過程の判読調査

構築した時系列データセットにより災害前と災害直後を基準に災害 5 年後までのパンシャープン画像を比較した。各 5 時期のパンシャープン画像を図 3.10 に示す。海岸堤防においては、応急復旧・本復旧を焦点に当て復旧過程を画像判読により調査した。東部復興道路においては災害 5 年後の工事進捗状況をパンシャープン画像の画像判読により調査した。

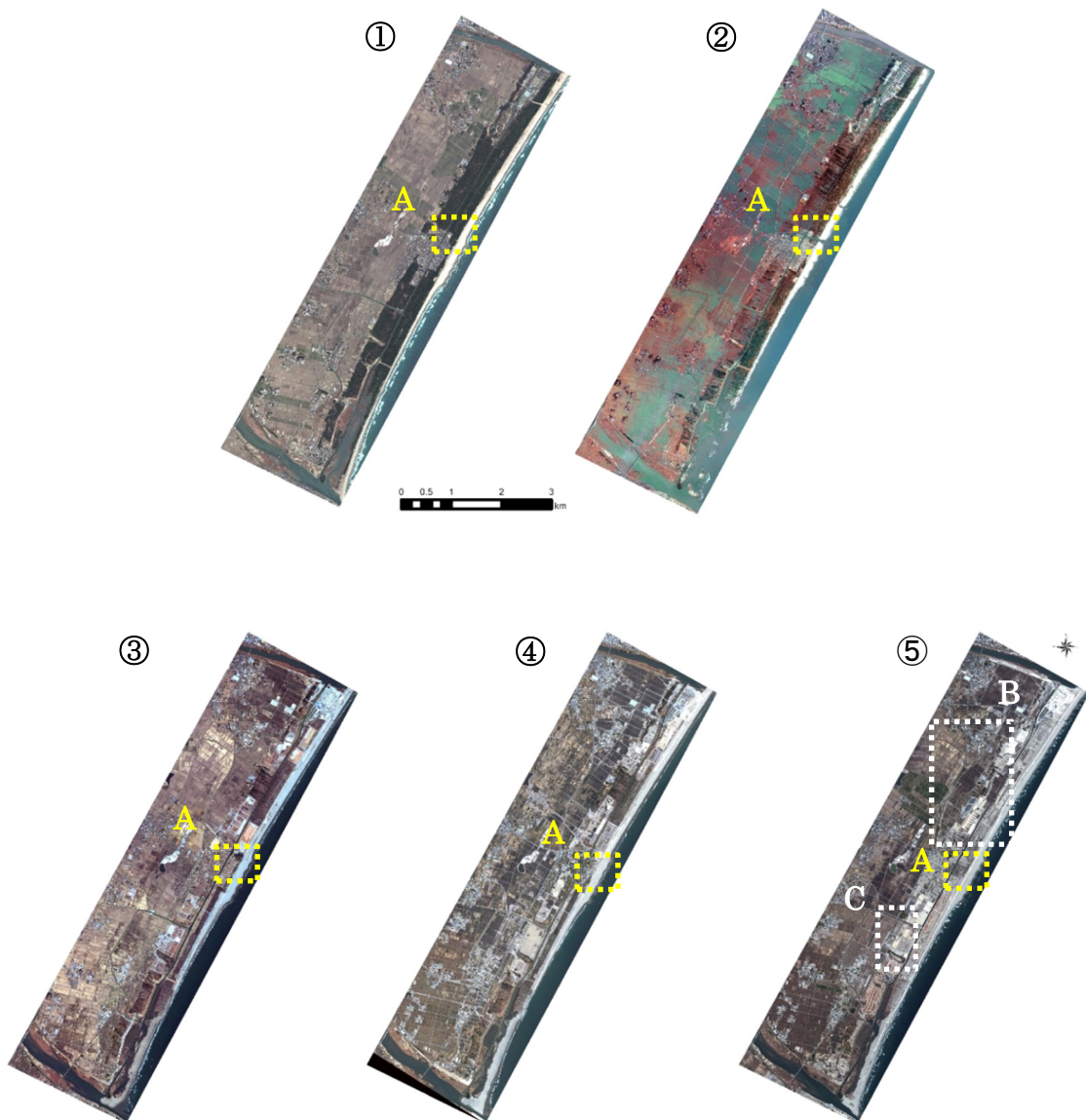


図 3.10 使用衛星データ

- ①2010/4/4 (災害前), ②2011/3/14 (災害直後), ③2013/4/14 (災害 2 年後),  
④ 2014/4/2 (災害 3 年後), ⑤2016/4/13 (災害 5 年後)

### 3.3.1. 海岸堤防の変化過程

5 時期のパンシャープン画像の全体図の図 3.10 に示す A 地点の拡大図を図 3.11 に示す。災害直後画像から津波により湛水している状況が確認できる。災害 2 年後においては災害緊急復旧工事による土嚢やブロック張りによる復旧工事と堤防沿いに造成されている様子が確認できる。災害 5 年後においては土嚢の撤去や堤防の強化および延長が確認できる。これらにより海岸堤防復旧工事の被災状況や緊急復旧および本復旧の工事進捗状況を把握することが可能であった。

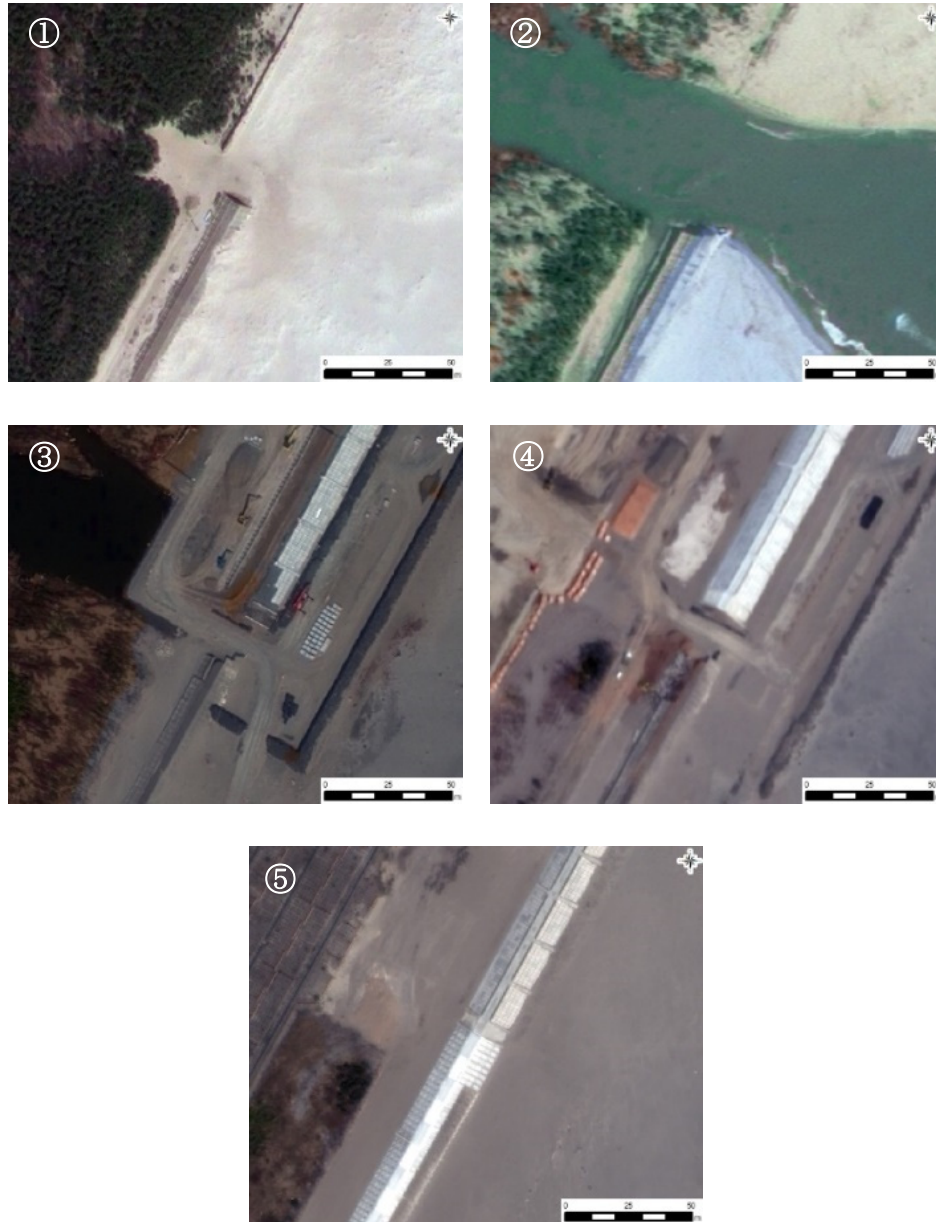


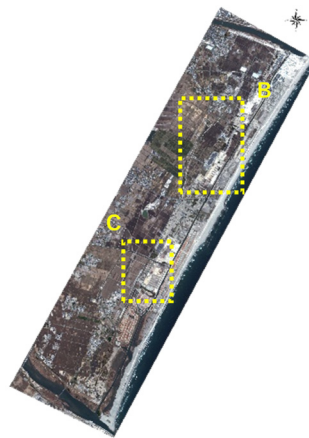
図 3.11 海岸堤防の変化過程

- ① 2010/4/4 (災害前), ②2011/3/14 (災害直後), ③2013/4/14 (災害 2 年後),  
④2014/4/2 (災害 3 年後), ⑤2016/4/13 (災害 5 年後)

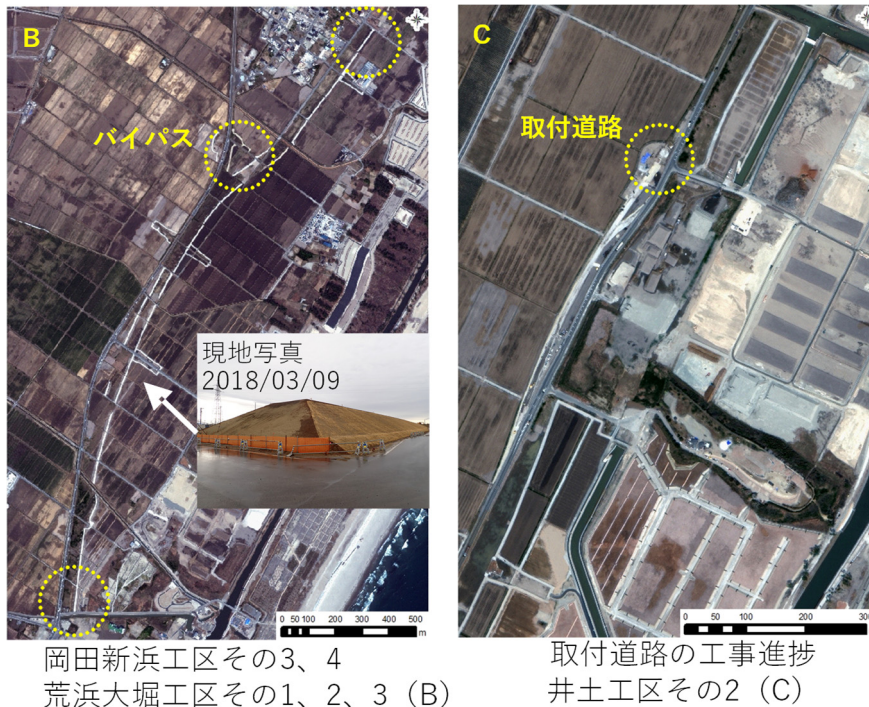


### 3.3.2. 復興道路の変化過程

東部復興道路整備事業は平成 26 年度に着工した。そのため、着工後の災害 5 年後のパンシャープン画像を用いて判読調査を行った。復興道路を示すパンシャープン画像を図 3.12 に示す。復興道路は白線として示されていることがわかる。また、B 地点においては若林区荒浜新地区の避難道路である県道荒浜原町線と交差を始点とし、宮城野区新浜地区まで復興道路が確認でき、災害 5 年後時点で 2.5km 程度の延長であった。既設道路とつながるバイパスの着工が確認できる。また、C 地点においては県道の上を交差する取付道路の整備として盛土工事が確認できる。これらにより復興道路の工事進捗状況を面的に把握することが可能であった。



(e) 災害 5 年後 2016/04/13



岡田新浜工区その3、4  
荒浜大堀工区その1、2、3 (B)

取付道路の工事進捗  
井土工区その2 (C)

図 3.12 復興道路の工事状況 (2016/4/13)

### 3.3.3. 海岸林の変化過程

図 3.13 より災害前後画像から濃緑色に表示されていた海岸林が薄赤色や薄緑色への変化が確認できる。災害直後では、海岸林がまばらに見られることから津波による流出が推定される。また、災害 2 年後では被災した海岸林の撤去や植生地盤の造成工事が確認できる。災害 3 年後以降は植生基盤再生のための造成工事が進み、海岸林の減少が認められた。災害 5 年後においては植生地盤の造成工事範囲において植生再生点が規則的に配列している様子が確認され、これらは植樹事業の進捗を捉えていると推察される。現地調査による植樹後の海岸林の生育状況からも推察される。

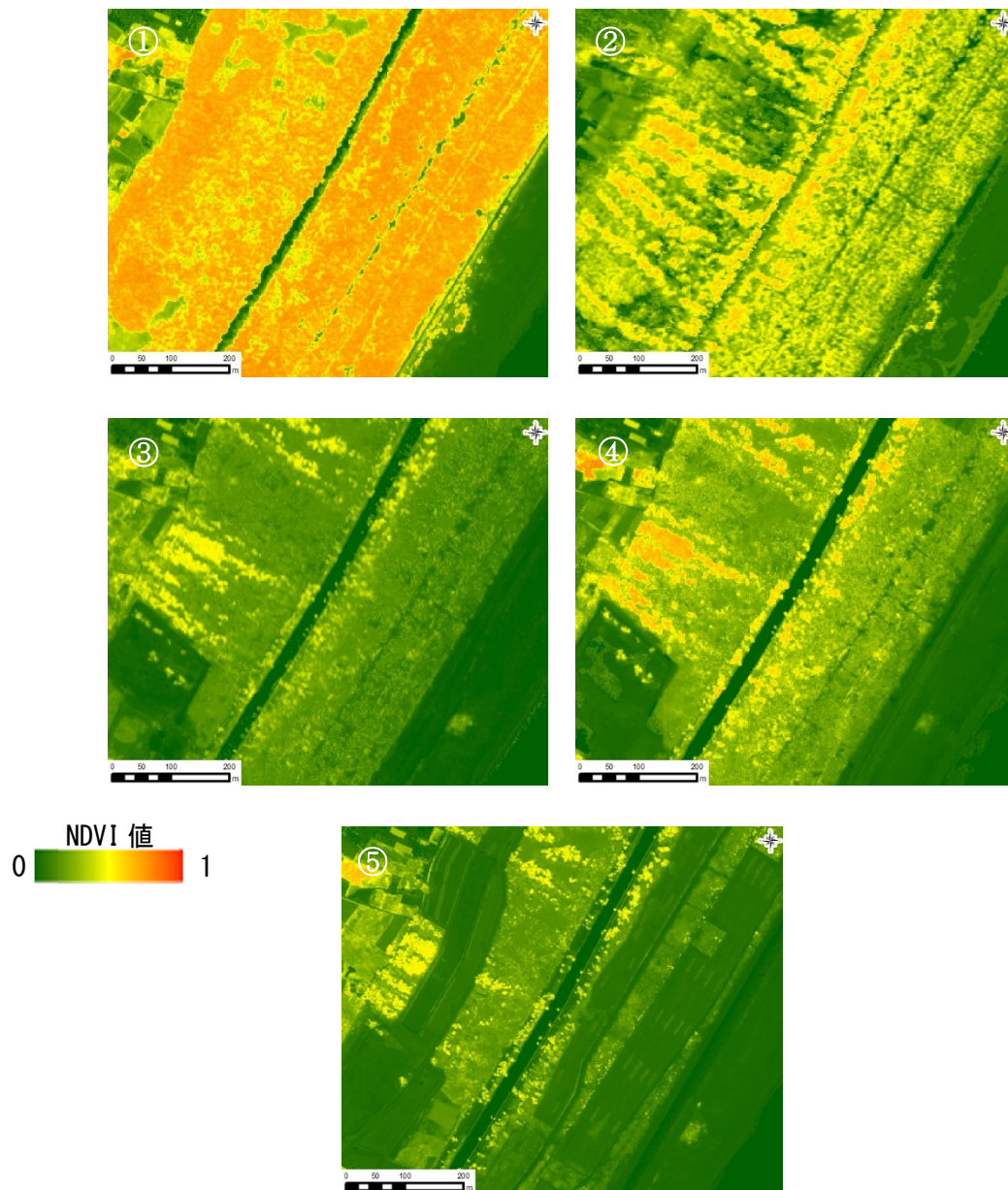


図 3.13 海岸林の変化過程

- ① 2010/4/4 (災害前), ②2011/3/14 (災害直後), ③2013/4/14 (災害 2 年後),  
④ 2014/4/2 (災害 3 年後), ⑤2016/4/13 (災害 5 年後)

### 3.4. 正規化植生指標値による海岸林の変化過程の評価

構築した時系列データセットの NDVI 値から海岸林の被害状況および変化過程を画像判読により調査した。各 5 時期の NDVI 画像を図 3.14 に示す。なお、海岸林の領域は災害前画像から求めた。加えて詳細な判読が必要な場合は、パンシャープン画像を参照した。さらに海岸林領域の NDVI 値の構成比と直近 2 時期の植生域の抽出結果と差分値の算出結果から海岸林の変化過程を面的および海岸領域内の植生域の割合で評価した。

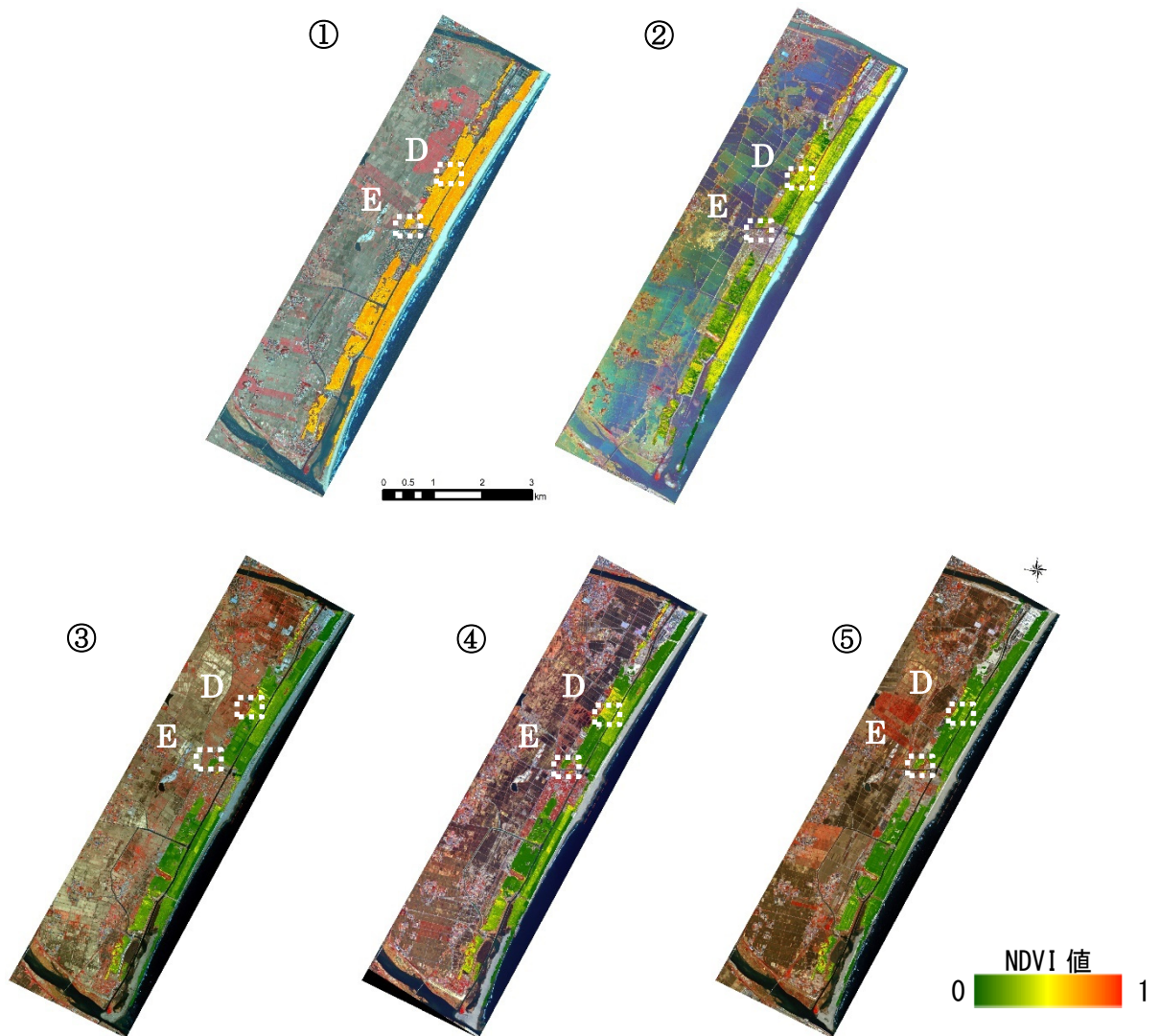


図 3.14 使用衛星データ

- ① 2010/4/4 (災害前), ②2011/3/14 (災害直後), ③2013/4/14 (災害 2 年後),  
④ 2014/4/2 (災害 3 年後), ⑤2016/4/13 (災害 5 年後)

### 3.4.1. 沿岸域における土地造成被覆の変化過程

海岸林領域内の NDVI 値をフォルスカラー表示のパンシャープン画像に重畳した図を図 3.14 に、D 地点と E 地点の拡大図を図 3.15、図 3.16 に示す。災害直後と災害 2 年後以降を比較すると、黄色や橙色で示される海岸林の残存範囲が多くの範囲で緑色に変化していることから、NDVI 値の低下が見られる。これらは被災した海岸林が撤去され、植生地盤の造成工事による影響と考えられる。災害 3 年後で残存する海岸林と造成工事範囲を示す黄色と緑色で構成される領域が明確に分類することができる。災害 5 年後では海岸林領域の全域で緑色に示されていることから、植樹のための土壌改変によると考えられる造成工事の進捗が確認できる。

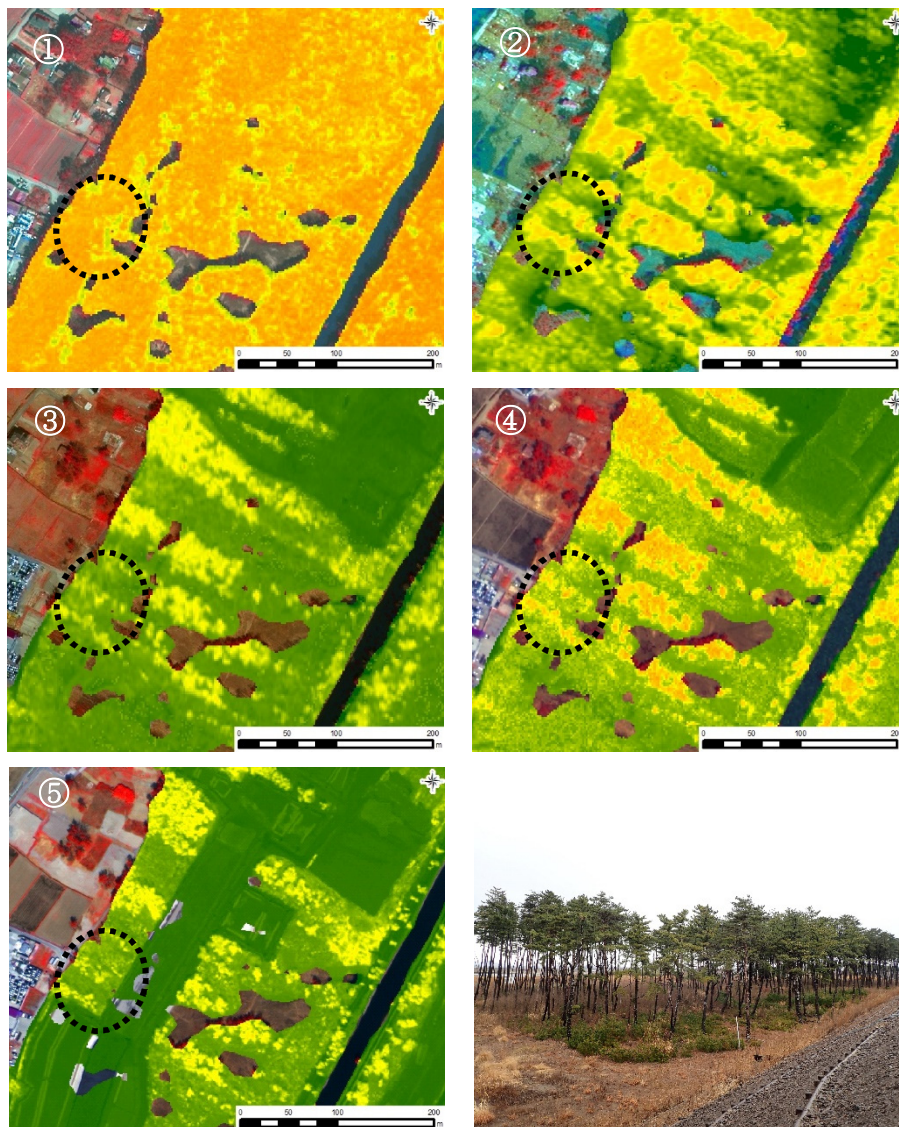


図 3.15 D 地点の拡大図

- ① 2010/4/4 (災害前), ②2011/3/14 (災害直後), ③2013/4/14 (災害 2 年後),  
④ 2014/4/2 (災害 3 年後), ⑤2016/4/13 (災害 5 年後)

### 3.4.2. 海岸林領域における海岸林の変化過程

災害前では海岸林の繁茂による高い NDVI 値の分布傾向が沿岸域全域に広がっている（図 3.16）。その後、被災によって大きく分布形状が崩壊し、大きく変化していることが示されている。しかしながら被災 2 年間の間で、立ち枯れによる植生域の減少と、一方で植樹復旧作業は目立って行われていない傾向も考察することができる。特に E 地点の箇所では、災害直後においては災害前に比べ急激な NDVI 値の低下が確認でき、津波による海岸林の流出および倒木が原因と推察される。災害 2 年後では、さらに NDVI 値の低下が確認でき、立ち枯れなどの影響と推察される。災害 2 年後以降の NDVI 値の分布をみると、比較的高い個所が複数点在し始めていることが示された。これらから、残存する海岸林の再活性化のほか新たな植栽による箇所の増加していることが考察できる。また、災害 2 年後以降にかけて、海岸林の植樹による NDVI 値の上昇が確認できる。このように植樹によって NDVI 値が上昇した過程は、現地写真からも推察された。なお、図中黒枠は大凡の写真範囲を示す。

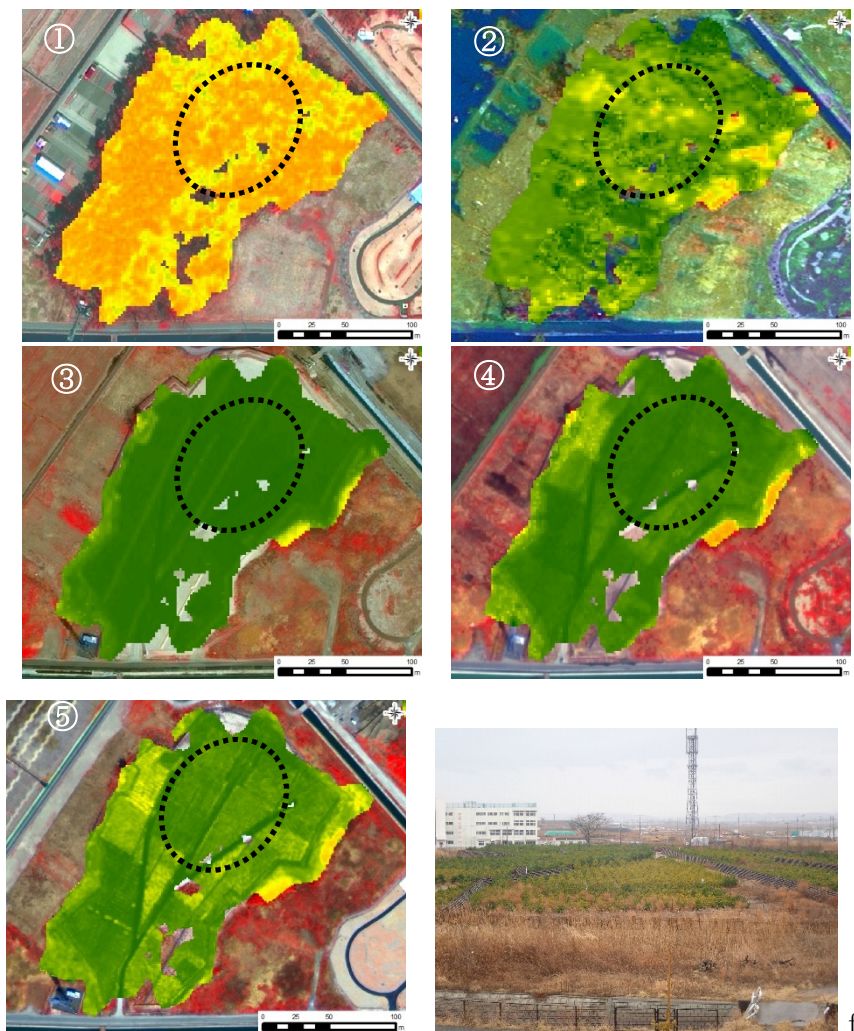


図 3.16 E 地点の拡大図

- ① 2010/4/4（災害前）、②2011/3/14（災害直後）、③2013/4/14（災害 2 年後）、  
④ 2014/4/2（災害 3 年後）、⑤2016/4/13（災害 5 年後）

### 3.4.3. 海岸林領域の NDVI 値の構成比による特性

災害前から災害 5 年後の 5 時期の海岸域領域内の NDVI 値の変化過程を図 3.17 に示す。なお、画像のピクセルサイズが異なるため、各々の NDVI 値が全体に対して占めている比率を構成比としてグラフ化した。図 3.17 から災害前は NDVI 値が高いことが確認できる。災害直後は津波による影響により NDVI 値の急激な低下が確認できる。

また、画像判読時では困難であったが、災害 2 年後以降の NDVI 値の変化傾向は時間経過とともに低下していることが確認できる。なお、災害 2 年後以降は復旧工事の進捗による造成範囲の変化なども含むことに留意する必要がある。また、NDVI 値を集計し、試行的に閾値が 0.2 以上を大凡健全な植生とし、植生域と非植生域で分類した（図 3.18）。なお、本検討においては衛星観測波長帯が同等の災害 3 年後以降の 2 時期（2014 年と 2016 年）の画像について適用した。海岸林領域における植生域の分布から災害 3 年後の植生域の割合は 35%程度であったが、災害 5 年後では 12%程度であり、復旧事業の進捗による残存する海岸林の撤去および造成による裸地化の影響を定量的に把握することができた。加えて植生域の抽出結果と現地写真の比較から、この箇所に残存する海岸林を抽出できていることが示された（図 3.19, 図 3.20）。

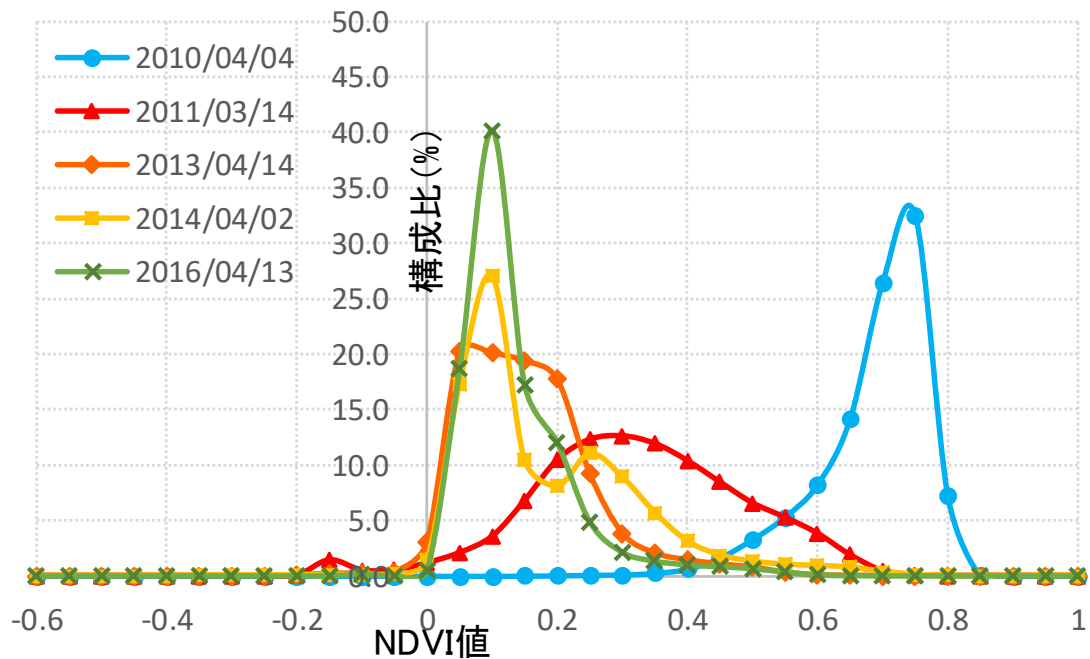


図 3.17 NDVI 値のヒストグラム

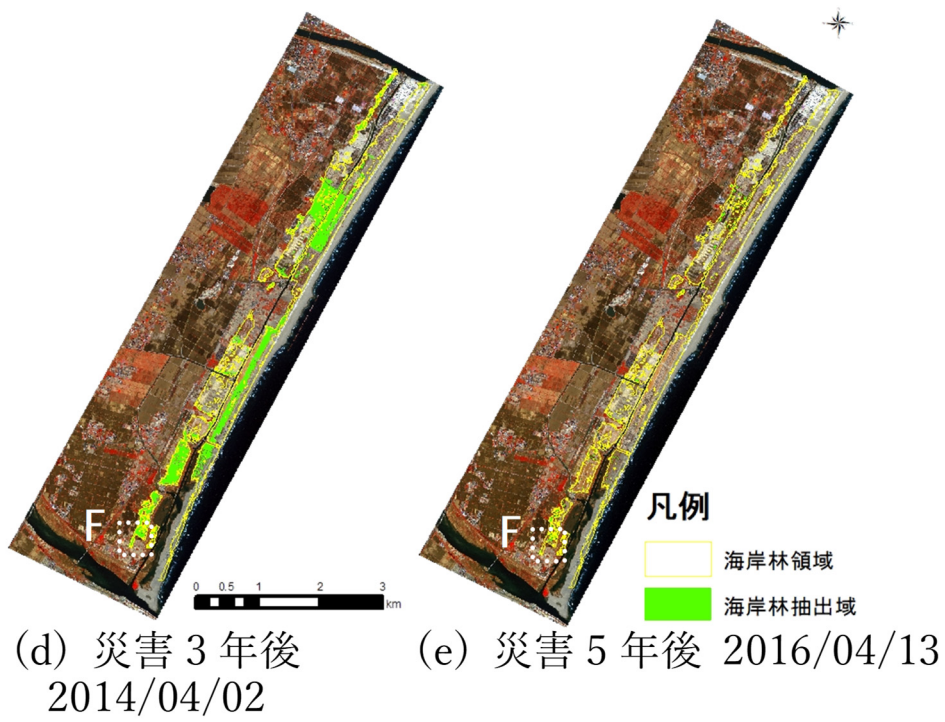


図 3.18 各時期の海岸林抽出結果

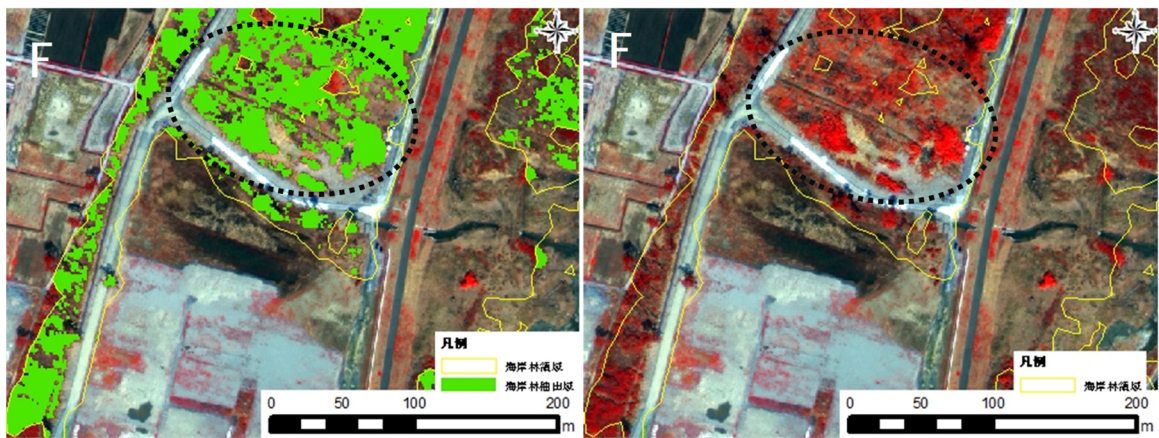


図 3.19 各時期の海岸林抽出結果の拡大図 (2016/4/13)  
 (左: 植生抽出域, 右: フォルスカラー)



図 3.20 F 地区の現地写真



### 3.5. 正規化植生指標値の差分解析による海岸林の変化過程の評価

#### 3.5.1. 差分画像による災害3年後以降の植生域の増減

災害3年後以降の直近2時期（2014年と2016年）のNDVI値を用いて差分画像を作成した（図3.21参照）。この差分画像の分布から海岸林の復旧状況を評価した。差分画像は災害3年後が災害5年後よりNDVI値の低い個所は赤く、高い個所は緑色に、変化が少ない個所は黄色で表示した。なお、黄色範囲においてはヒストグラムの平均値から正負に大凡 $1\sigma$ の範囲とした。全体的に黄色、緑色が多く分布していることがわかる。緑色の分布が密集しながら固まりかつ矩形範囲で多く表示されていることから、この期間に植樹事業を推進するための残存する海岸林の撤去による裸地化および造成が進められている傾向が示されていると考えられる。また、赤色範囲は点在しており、ここで用いた衛星観測期間内の植樹事業による影響と推察される。この赤点の多数の分布に関しては、この期間で植樹そのものが進行している場合や、至近の植樹実施のための土壌整備の一環としての木材チップによる表層被覆措置などによって比較的高いNDVI値を示す傾向が現地調査からも推察されたため、植樹事業推進の複数の要因が含まれている可能性があることに留意する必要がある（図3.22, 図3.23）。これらからNDVI値の差分手法を用いることで、視覚的に海岸林領域の海岸林の増減や復旧事業による影響が容易に把握することが可能であった。

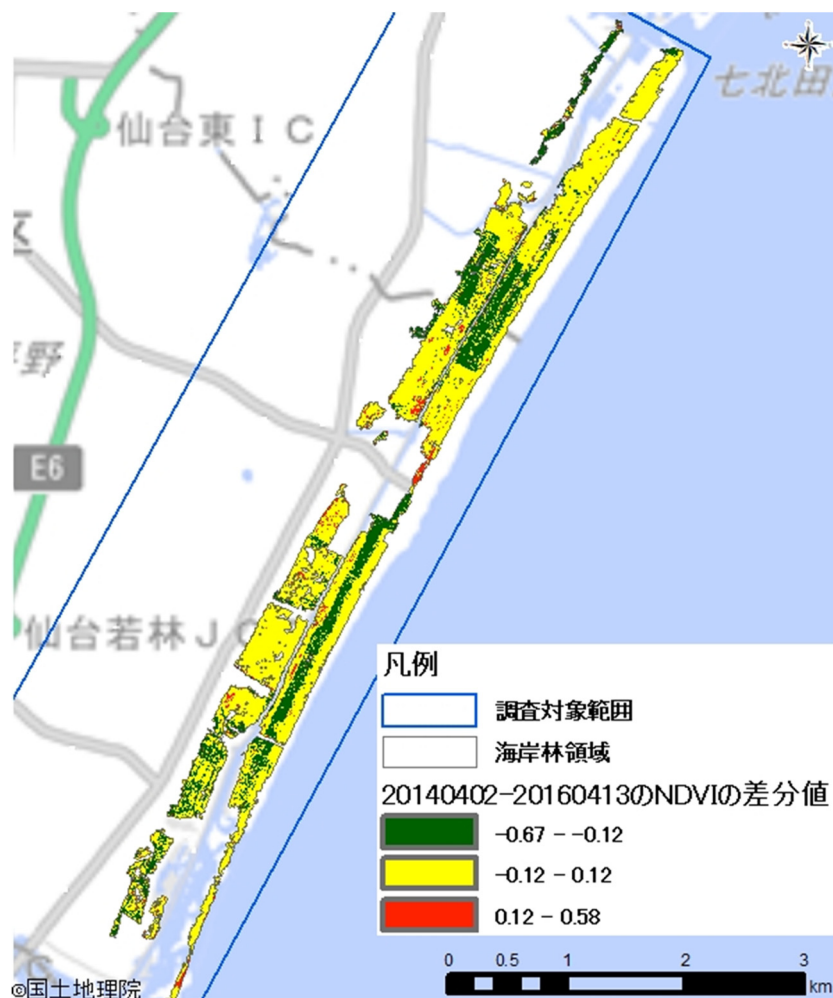


図 3.21 NDVI 値の差分解析結果

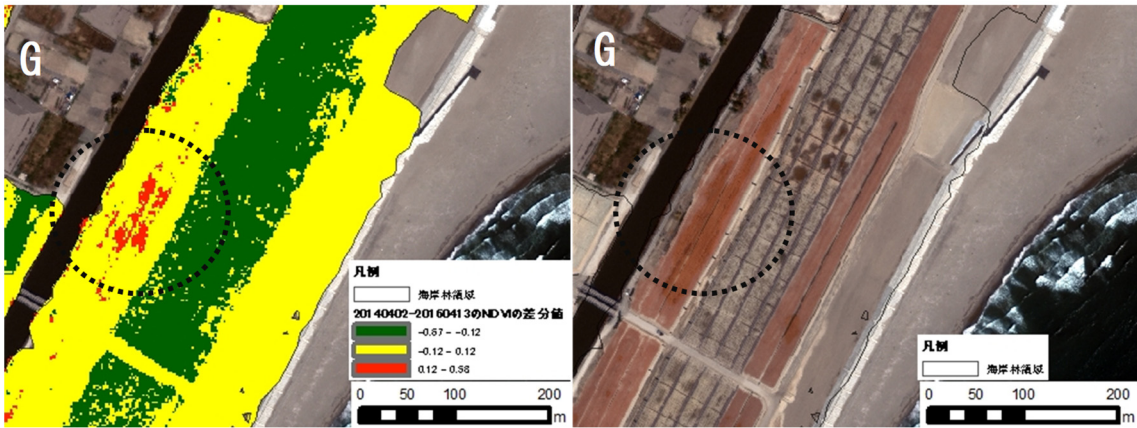


図 3.22 差分解析結果の拡大図



図 3.23 現地写真(2018年3月9日)

### 3.6. 本章のまとめ

被災地は災害直後のみならず、災害数年後までの長期的な復旧・復興計画を行うため、最適な間隔で効果的な観測手法を用いたモニタリングが必要である。本章では、東日本大震災で発生した津波により、甚大な被害を被った仙台平野の周辺沿岸域を対象に海岸堤防や復旧道路、海岸林を含む沿岸域の造成工事を対象に災害前を含む 5 時期の時系列データセットを構築することで、被害の形態やその後の応急復旧工事や復興工事の進捗状況をモニタリングした。

高分解能光学衛星画像のパンシャープン画像の目視判読により海岸堤防の被害からその応急復旧工事、復興工事の進捗を面的に把握できた。また、多重防災によるかさ上げ道路である東部復興道路の工事進捗状況も面的に把握できた。また、植生の活性度を示す NDVI 値を用いることで植栽事業の造成工事および植生の生長過程が効果的に把握できた。また、各種画像から得られた目視判読結果と現地調査結果を比較することにより、目視判読結果の整合性を確認した。加えて、災害前の海岸林領域に対して各観測画像の NDVI 値の構成比を比較することで災害直後の NDVI 値の低下と海水の流入によるナラ枯れの影響を確認した。また復旧工事における残存林の撤去と造成工事における裸地化の影響を把握された。さらに、復旧・復興フェーズにおける海岸林の面的な変化課程の把握方法として、災害 3 年後と災害 5 年後の NDVI 値の差分を行うことで、造成工事の進捗について把握手法を提案した。

これらから時系列な光学衛星画像データセットを構築することで、広域に面的に、さらには時系列的に復旧・復興フェーズの工事の進捗を把握することが可能であることが示された。加えて、NDVI 値を算出することで沿岸域に整備されていた海岸林および造成工事の把握が可能であることが示され、その他観測ツールと比較し、優位性が示されたと考えられる。また、光学衛星画像のみならず SAR 衛星を併用することで重点把握インフラのモニタリングに利用可能と考えられる。

ただし、日本においては、工事進捗は定期的に公表されることが多い。そのため、衛星画像による復旧・復興工事の進捗状況の把握は視覚的に捉えるで有効であるが、実務上の優位性はほとんどないと考えられる。一方、大規模な被害が発生しやすい東南アジアでは、その被害規模の大きさと観測ツールが乏しいという 2 点から復旧・復興工事の進捗管理として優位性があると考えられる。

## 4. 結論および展望

### 4.1. 本研究の結論

本研究では、光学・SAR 衛星画像のそれぞれの改善手法について双方の特性を活かした災害直後フェーズでの利用について検討を加えた。まず、平成 27 年 9 月関東・東北豪雨で被災した茨城県常総市の浸水被害と平成 30 年 7 月豪雨で被災した岡山県倉敷市真備町を対象に災害直後フェーズでの光学・SAR 衛星および空間情報を利用した抽出手法の提案を行った。利用した衛星画像の観測時間に併せた国土地理院の空中写真による推定浸水結果と比較し、改善手法の適用についてその有効性を評価した。また、光学・SAR 衛星画像の双方の課題である建物位置の浸水域の抽出手法について、街区形状の街区ポリゴンを用いることで街区内の浸水面積と建物面積に焦点を当てることで、抽出手法の提案を行った。加えて、2 時期間の SAR 衛星画像による干渉解析処理により得られる干渉度を示すコヒーレンス値を利用することで浸水建物を判別し、災害前後の強度情報から得られた浸水域とマージすることで、抽出手法の提案を行い、その有効性について検討を加えた。さらに平成 30 年 12 月のアナク・クラカタウ火山の山体崩壊により発生した周辺沿岸域への津波被害域の抽出についてフリーで入手可能な準リアルタイム衛星画像を用いることにより、災害直後における有用性を検討した。

また、復旧・復興フェーズにおける衛星画像の利用検討のため、東日本大震災で発生した津波により、甚大な被害を被った仙台平野の周辺沿岸域を対象に海岸堤防や復旧道路、海岸林を含む沿岸域の造成工事を対象に、災害前を含む 5 時期の時系列データセットを構築することで、被害の形態やその後の応急復旧工事や復興工事の進捗状況をモニタリングした。この結果から復旧・復興事業の進捗状況の継続的な定期的に適切な把握について時系列データセットの利用について、その有効性を検討した。

災害直後フェーズおよび復旧・復興フェーズのそれぞれの検討結果を以下に要約して示す。

#### ① 災害直後フェーズ

- 光学衛星画像による浸水域を抽出する場合、河川から堤内に流入する水が泥や砂が混入することから、砂漠化の指標として用いられている GSI 値を災害後のみの衛星画像に適用することで、衛星画像のみで国土地理院による推定浸水域と比較して、抽出率 70%、正答率 73%程度の評価が得られた。以上から河川洪水且つ河川沿いに水田が整備されている洪水被害の場合、GSI 値による浸水域抽出の有効性が認められた。また、岡山県倉敷市真備町で使用した衛星画像は災害後のみの SPOT-7 衛星画像であり、マルチスペクトルの分解能で 6m 程度であり、災害前のアーカイブ画像がない場合も本手法は適用できることや、6m クラスの分解能でも大凡の浸水域は抽出できたと考えられる。ただし、光学衛星画像のみでは建物の位置する箇所において抽出が困難であった。
- 光学衛星画像の浸水域の抽出結果に対し、基盤地図情報 10mDEM、河川区域の空間情報を用いることで正答率の向上が確認できた。また、抽出した浸水域に囲まれる領域の補正を行うことで、さらに抽出率の向上が確認できた。ただし、DEM データを用いる場合は、事前に公表されている浸水ハザードマップや該当地域の地域特性を把握することでその閾値を設定する必要がある。また、浸水域に囲まれる抽出結果の補正はくぼ地では適用すると過抽出となるため、平地における空間処理の適用においても考慮する必要がある。
- 浸水建物の抽出のため、建物を示すポリゴンデータと災害前後の 2 時期間の干渉度を示す

コヒーレンス画像を用いることで、浸水建物と非浸水建物の判別を行った結果、建物内のコヒーレンス値の平均値を求めることで対象範囲内の建物において抽出率 66%、正答率 67%に分類できるよう閾値を設定したことで大凡の浸水推定建物の特定に有効であることが示された。

- SAR 衛星画像による浸水域を抽出する場合、地表面の粗さ（ラフネス）の変化から浸水を示す水面への変化をとらえるため、振幅情報から変換した後方散乱係数の差から閾値を設定することで抽出を行った。その結果、SAR 衛星画像のみの抽出では、国土地理院の推定浸水域と比較し、抽出率 70%、正答率 35%程度であった。正答率が比較的低い理由は、フィルタ処理で減じているものの SAR 特有のノイズが混在している理由と考えられる。なお、SAR 衛星は夜間・悪天候でも観測することが可能であることから深夜に発生した場合や、悪天候が続く場合は災害対応の立案にも利用することが想定できることから、得られた浸水域の抽出結果は利用できる可能性がある。ただし、光学衛星画像と同様に建物立地領域の抽出は強度情報からは困難である傾向であった。これは衛星観測方向側の領域における災害後に形成された水面と建物側面の 2 面反射が形成される領域で顕著であった。
- SAR 衛星画像の浸水域の抽出結果に対し、光学衛星画像と同様に、基盤地図情報 10mDEM、河川区域の空間情報を用いることで正答率の向上が確認できた。この改善段階に対し、コヒーレンス値による浸水推定建物をマージすることで、浸水域の抽出結果として提案した。その結果、改善手法前後で比較して抽出率が 2%程度向上することを確認し、災害直後フェーズでの利用における有効性を確認した。
- インドネシア国のアナク・クラカタウ火山の山体崩壊による津波の被害領域の抽出手法について検討した。災害前後の同季節に観測された各 3 シーン、計 6 シーンのフリーで入手が可能である空間分解能 30m 程度中分解能光学衛星画像である Landsat-8 衛星による災害直前・直後のスペクトラル補正および雲補正の有効性が確認できた。また、NDVI 値の差分による閾値を用いることで浸水域を抽出した結果、災害後の光学衛星画像の目視判読結果と比較して、抽出率が 38%~55%、正答率は 59%~73%であった。抽出率は低い結果となったが、海岸線沿いに抽出できていることから大凡の被害域の形状は把握することが可能であることが示された。ただし、建物被害域については未抽出である傾向が示された。これらから本災害のような広域的な被害に対する概要調査としての利用可能性が示された。
- 光学衛星画像と同様にフリーに入手可能である C バンドの波長特性を有する Sentinel-1 衛星画像を用いて津波被害域の抽出の検討を行った。強度情報と干渉解析結果から得られるコヒーレンス画像をカラー合成して得られる MTC 画像による浸水域の抽出においては、津波被害による後方散乱係数の低下およびコヒーレンス値の低いピクセル値を示す領域の傾向を示されたものの、明瞭に把握することは困難であった。また、津波により森林が大規模に流出した領域は明瞭に判読が可能であった。これらの検討結果から、即応性が求められる災害対応での利用可能性も示されたと考えられる。

以上より、災害直後フェーズでの衛星画像および空間情報を利用した浸水域の抽出結果に対し、光学および SAR 衛星を主とした抽出結果の提案を行った結果、それぞれ衛星画像のみの

解析結果から空間情報を併用した提案手法の方が浸水域の精度が向上したことが確認された。また、従来、衛星画像のみでは判断が困難であった建物領域の浸水に対して、街区ポリゴンを利用した提案手法とコヒーレンス値を利用した提案手法を用いることで浸水推定建物の抽出の有効性を示すことができた。このことは災害直後フェーズにおける衛星画像のさらなる利用に期待ができると考えられる。観測後に準リアルタイムにフリーに入手が可能な中分解能な光学衛星画像による広範囲におよび津波被害域の抽出手法が検討され、災害直後の概要調査としての有効性を示すことができた。また、SAR 衛星画像においては、抽出は困難であることが推測されるが、MTC 画像による大規模な土地被覆の変化は判読可能であった。今後、津波被害域の判読・抽出手法について検討を進める必要がある。

災害直後フェーズにおける光学・SAR 衛星画像および地理空間情報を併用した解析および利用方法について検討を行った結果から、災害時における災害情報の収集において効果的であることが示されたと考えられる。また、光学・SAR 衛星のコンステレーションにおける利用について本手法の適用性が検証できたと考える。

## ② 災害復旧・復興フェーズ

- 東日本大震災の災害前から災害から 5 年後の 5 時期の高分解能衛星画像から得られるパンシャープン画像および NDVI 値から仙台海岸沿岸域の海岸堤防や復興道路および海岸林を対象に復旧・復興状況を把握・抽出した。大規模災害による長期的な復旧過程の中で、特に重要視される初期期間の復旧過程を、高分解能衛星画像による時系列データセットを構築したことで詳細に把握できた。このことで、仙台海岸沿岸域の海岸堤防や周辺インフラの復旧状況と植生環境変化の過程が時系列なパンシャープン画像の判読処理から把握できた。ただし、日本においては、工事進捗は定期的に公表されることが多い。そのため、衛星画像による復旧・復興工事の進捗状況の把握は視覚的に捉えるで有効であるが、実務上の優位性はほとんどないと考えられる。一方、大規模な被害が発生しやすい東南アジアでは、その被害規模の大きさと観測ツールが乏しいという 2 点から復旧・復興工事の進捗管理として優位性があると考えられる。
- 高い空間分解能で面的に得られた地表からの分光特性について画像処理を施すことにより、応急復旧および本復旧工事による地表環境の変化状況や、残存海岸林および周辺植生の面的な変化過程と NDVI 値を用いた植生の健全度の統計的分布の観点から効果的に示された。また、植樹支援に伴う地表環境の状況も NDVI 値の分布特性から考察する可能性を示唆することができた。このことは植樹および植生の生長などに伴う海岸林の健全度を把握する効果的な手法として考察された。

以上の検討結果より、災害直後および災害後の復旧状況の把握に時系列な高分解能衛星画像データセットを構築することにより、復旧過程の特徴把握や進捗状況の長期的且つ継続的な変化過程のモニタリングに有効に活用されることが示唆されたと考えられる。

本研究では、浸水災害時における衛星画像を用いた浸水域の現状の抽出手法は、衛星画像のみからの抽出がほとんどであり、空間情報あるいは異種衛星との併用による災害直後フェーズでの手法の検討には至っていないことや、衛星画像の特徴である広域的・周期的に観測できる特性を活かした復旧・復興フェーズでの利用はほとんど検討されていない課題に対して、災害直後フェーズと復旧・復興フェーズでの衛星画像による浸水域の抽出手法の高度化と異種衛星

による併用手法の開発を目的とした。また、災害対応を担う政府・地方自治体の意思決定への寄与を目標とした。その結果、災害直後フェーズにおいて、各種衛星の特性や地理空間情報を併用した高精度な浸水域の抽出手法を確立した。さらにその適用範囲を把握することにより、社会実装のための実災害時の緊急を要する災害直後の初期的な概要調査としての被害情報の収集に対しての利用方法についての有用性が示された。復興・復興フェーズにおいては、適切な復旧・復興事業計画の把握手法の利用可能性が示されたと考えられる。

## 4.2. 今後の展望と課題

本論文は、光学衛星画像と SAR 衛星画像および空間情報を利用した災害直後フェーズにおける浸水被害領域の抽出について従来の浸水域抽出手法に変わる、衛星コンステレーションを見据えた抽出手法について検討したものである。さらに、災害復旧・復興フェーズにおいて応急復旧工事、復興フェーズに焦点を当てて、特に広域な災害における被災地を対象として、時系列的なデータセットの構築を行うことで、インフラの工事進捗状況や植生環境について変化過程の把握手法について提案したものである。本論文の趣旨は、近年国内・国外において衛星画像のみならず宇宙産業におけるパラダイムチェンジが予想される中、衛星画像および空間情報を利用して災害大国である日本における災害対応の実利用に即した解析技術の向上を検討した。また、光学・SAR 衛星の各種特性を活かした利用方法について検討を進めることで、衛星コンステレーションを見据えた光学・SAR 併用の災害時の利用方法についても検討を行い、その可能性を指摘したことにある。特に、従来衛星画像のみの解析では困難であった浸水建物の抽出の課題に対し、その課題解決のために空間情報の利用およびコヒーレンス値を利用した改善手法を提案して評価検討を行うことができたと考えられる。これらの検討結果は今後、同様の災害に対して適用し、その利用特性について整理することでより手法のブラッシュアップをおこない、衛星画像の災害利用における社会実装について検討を継続する必要がある。

今後は、衛星画像の広域且つ周期的な観測特性を活かし、光学・SAR 衛星画像の特性を活かした本研究での提案手法を適用することで浸水域の抽出結果の精度向上が期待できると考えられる。このことは、災害対応を担う政府および地方自治体における災害時の立案および意思決定について寄与するものと考えられる。また、職員は被災者対応に多忙を極めるため、災害対応時の概略的かつ面的な災害領域の特定は困難であることが東日本大震災の経験から言われており、本研究で得られた知見は、被災状況の把握の迅速化が可能であると考えられる。さらに、被災状況の概略調査における衛星画像解析においてはアウトソーシングすることにより、職員の負担を軽減することが可能となり、オールジャパンとしての防災・減災の取り組みの一旦を担うことが期待される。また、復旧・復興時のモニタリングは、効果的に利用できることが示されたと考えられる。被害を最小限に抑えるためには、災害直後の対応が最も重要であるが、平時からの備えが必要であり、時系列データセットを構築することでその被害を面的に捉えることも可能である。また、時系列データセットを構築することで災害のみならず多方面・他分野の衛星画像を利用することが可能であり、多角的な利用に対して応用可能であると考えられる。



## 参考文献

- [1] 内閣府：災害対策基本法，<<http://www.bousai.go.jp/taisaku/kihonhou/index.html>>
- [2] 内閣府：戦略的イノベーション創造プログラム（SIP：Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program），<<https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/sipgaiyou.pdf>>
- [3] 内閣府：平成 16 年版防災白書，<<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/h16/bousai2004/html/honmon/index.htm>>
- [4] 内閣府：平成 22 年版防災白書，<<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/h22/bousai2010/html/zu/zu001.htm>>
- [5] 内閣府：平成 30 年版防災白書，<[http://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/h30/honbun/3b\\_6s\\_09\\_00.html](http://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/h30/honbun/3b_6s_09_00.html)>
- [6] 内閣府：宇宙産業ビジョン 2030，<<https://www8.cao.go.jp/space/vision/mbrlistsitu.pdf>>
- [7] 関谷知孝，向井田明，平賀一博：地球観測衛星データを社会インフラとして利用定着させるための方策の調査検討，計測と制御，Vol.53，No.11，pp.1001-1005，2014.
- [8] 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）：だいち防災 WEB ポータル，<<https://jaxa-dis.maps.arcgis.com/home/index.html>>
- [9] 宮崎景太，石野達哉，園部雅史，櫻井洋祐：ALOS-2 の防災利用実証，日本航空宇宙学会，第 59 回宇宙科学技術連合講演会講演集，JSASS-2015-4112，2015.
- [10] 宇宙航空研究開発機構：陸域観測技術衛星「だいち」（ALOS），<[http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos/index\\_j.html](http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos/index_j.html)>
- [11] OneWeb：コンステレーションイメージ，<[http://www.dokeiren.gr.jp/assets/files/pdf/topics/201902vision\\_1.pdf](http://www.dokeiren.gr.jp/assets/files/pdf/topics/201902vision_1.pdf)>
- [12] National Aeronautics and Space Administration (NASA)，The Landsat Program：<<https://landsat.gsfc.nasa.gov/>>
- [13] United States Geological Survey(USGS)：Landsat Missions，<<https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat>>
- [14] European Space Agency (ESA)：SENTINEL Missions，<<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions>>
- [15] 経済産業省：第四次産業革命下における宇宙産業政策，～「Tellus」政府衛星データのオープン&フリー化～，<[https://www.usss.kyoto-u.ac.jp/uchugaku/seminar/2018/20181130\\_Kunisawa.pdf](https://www.usss.kyoto-u.ac.jp/uchugaku/seminar/2018/20181130_Kunisawa.pdf)>
- [16] 株式会社パスコ：マルチスペクトル画像とは？，<<https://www.pasco.co.jp/recommend/word/word103/>>
- [17] ESA：Satellite frequency bands，<[https://www.esa.int/Applications/Telecommunications\\_Integrated\\_Applications/Satellite\\_frequency\\_bands](https://www.esa.int/Applications/Telecommunications_Integrated_Applications/Satellite_frequency_bands)>
- [18] 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構：ALOS-2 パンフレット，<<https://fanfun.jaxa.jp/countdown/daichi2/files/daichi2.pdf>>
- [19] The International Charter Space and Major Disasters，<<https://disasterscharter.org/web/guest/about-the-charter>>
- [20] 滝口 太，渡辺 拓真：地球観測衛星が捉えた東日本大震災，日本写真測量学会，Vol.50，No.3，pp.154-161，2011.
- [21] Asia-Pacific Regional Space Agency Forum (APRSAP)：Sentinel Asia，<<https://sentinel.tksc.jaxa.jp/sentinel2/topControl.jsp>>

- [22] 千葉丈久, 高田裕司, 田辺玲, 加来一哉, 高橋陪夫: 国際災害チャータによる災害観測, 写真測量とリモートセンシング, Vol.55, No.4, pp.263-268, 2016.
- [23] 気象庁: 全国 (アメダス) の 1 時間降水量 50mm 以上の年間発生回数, <[http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme\\_p.html](http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html)>
- [24] United Nations: 2009, Risk and poverty in a changing climate, <<https://www.undp.org/content/dam/rbap/docs/Research%20&%20Publications/CPR/APRC-CPR-2009-GAR-DRR.pdf>>
- [25] 国土交通省: TEC-FORCE (緊急災害対策派遣隊), <<http://www.mlit.go.jp/river/bousai/pch-tec/index.html#sec01>>
- [26] 内閣府: 復旧・復興ハンドブック (平成 28 年 3 月), <<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/houkokusho/hukkousesaku/saigaitaiou/index.html>>
- [27] 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構: 人工衛星の防災利用について, <<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/saigaiyouhouhub/dai5kai/pdf/shiryo5.pdf>>
- [28] 総務省: 平成 28 年度版情報通信白書 (PDF 版), <<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h28/pdf/index.html>>
- [29] 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>>
- [30] 一般財団法人消防防災科学センター: 防災図上訓練, <[http://www.isad.or.jp/to\\_municipalities/disaster\\_prevention\\_map/](http://www.isad.or.jp/to_municipalities/disaster_prevention_map/)>
- [31] 国土交通省: 統合災害情報システム (DiMAPS), <<http://www.mlit.go.jp/saigai/dimaps/>>
- [32] 国土交通省: 平成 30 年度の重点対策 (全体版), <<http://www.mlit.go.jp/river/bousai/earthquake/pdf/earthquake/7kai-ref02-05.pdf>>
- [33] 内閣府: 災害対策標準化推進ワーキンググループ (第 4 回資料 2), <<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/wg/saigaitaisaku/pdf/dai4kai/shiryou2.pdf>>
- [34] 常総市: 平成 27 年 9 月関東・東北豪雨による被害概要, <[http://www.city.joso.lg.jp/ikkrwebBrowse/material/files/group/38/city\\_guide\\_2016\\_2\\_02\\_contents.pdf](http://www.city.joso.lg.jp/ikkrwebBrowse/material/files/group/38/city_guide_2016_2_02_contents.pdf)>
- [35] 国土交通省関東地方整備局: 『平成 27 年 9 月関東・東北豪雨』の鬼怒川における洪水被害等について, <[http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr\\_content/content/000634942.pdf](http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000634942.pdf)>
- [36] 気象庁: 平成 30 年 7 月豪雨 (前線および台風第 7 号による大雨等) (速報), <[https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2018/20180713/jyun\\_sokuji20180628-0708.pdf](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2018/20180713/jyun_sokuji20180628-0708.pdf)>
- [37] 国土交通省: 平成 30 年 7 月豪雨における被害等の概要, <[https://www.mlit.go.jp/river/sihinngikai\\_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shouinkai/daikibokouikigouu/1/pdf/daikibokouikigouu\\_01\\_s2.pdf](https://www.mlit.go.jp/river/sihinngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shouinkai/daikibokouikigouu/1/pdf/daikibokouikigouu_01_s2.pdf)>
- [38] EUROPEAN COMMISSION JOINT RESEARCH CENTRE: JRC Emergency Reporting - Activation #029 - 24 Dec 2018, <<http://www.gdacs.org/Public/download.aspx?type=DC&id=137>>
- [39] NatureGeoscience: Tsunamis revisited, Vol.12,MARCH,2019 pp.149,<<https://www.nature.com/articles/s41561-019-0328-4.pdf>>
- [40] 林野庁九州森林管理局長崎森林管理署: 雲仙・普賢岳と眉山の治山,<<http://www.rinya.maff.go.jp/kyusyu/nagasaki/pdf/26chisangaiyou.pdf>>

- [41] 気象庁：渡島大島,<[https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/sapporo/115\\_Osimaosima/115\\_index.html](https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/sapporo/115_Osimaosima/115_index.html)>
- [42] 気象庁：火山噴火予知連絡会衛星解析グループ，火山活動の評価及び噴火活動の把握に関する共同研究平成 27 年度成果報告書，<<https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/EISEI/201603/report.pdf>>
- [43] 気象庁：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震 ～The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake～，<[https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/2011\\_03\\_11\\_tohoku/201103111446\\_smap\\_ks.png](https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/2011_03_11_tohoku/201103111446_smap_ks.png)>
- [44] 公益社団法人日本水道協会：平成 23 年(2011 年)東日本大震災における管本体と管路付属設備の被害調査報告書，<[http://www.jwwa.or.jp/houkokusyo/pdf/higashinohon\\_daishinsai2/higashinohon2\\_all.pdf](http://www.jwwa.or.jp/houkokusyo/pdf/higashinohon_daishinsai2/higashinohon2_all.pdf)>
- [45] 国土交通省：東日本大震災記録，「国土交通省の災害対応」，<<http://www.mlit.go.jp/common/000208803.pdf>>
- [46] 林野庁東北森林管理局：海岸防災林，防波堤等施設の復旧（海岸防災林の復旧における進捗状況について），<[http://www.rinya.maff.go.jp/tohoku/koho/saigaijoho/attach/pdf/h23\\_higasinihon\\_daisinsai-1.pdf](http://www.rinya.maff.go.jp/tohoku/koho/saigaijoho/attach/pdf/h23_higasinihon_daisinsai-1.pdf)>
- [47] 佐藤創，島田宏之，真坂一彦，阿部友幸，野口宏典，木村公樹，坂本和巳：東北地方太平洋沖地震津波によるクロマツ海岸林被害と林分構造の関係，海岸林学会誌，Vol.11, No.2, pp.41-45, 2012.
- [48] 山中啓介，藤原道郎，林田光祐，後藤義明，鈴木覚，宮前 崇，井上章二，坂本和巳：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震で発生した津波が仙台市井土地区の海岸林に及ぼした影響－防波堤と海岸クロマツ林の被害との関係－，海岸林学会誌，Vol.11, No.1, pp.19-25, 2012.
- [49] Gang R. and Aiming L. : Distribution of inundation by the great tsunami of the 2011 Mw 9.0 earthquake off the Pacific coast of Tohoku(Japan), as revealed by ALOS imagery data, International Journal of Remote Sensing, Vol.32, No.22, pp.7073-7086, 2011.
- [50] 羽柴秀樹，久保田進：衛星画像による東北地方太平洋沖地震津波による災害の初動調査，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.67, No.2, pp.1311-1315, 2011.
- [51] 羽柴秀樹，杉村俊郎，青山定敬，朝香智仁：高分解能衛星リモートセンシングを利用した仙台平野沿岸域海岸林の被災後の変化調査，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol.71, No.2, pp.999-1004, 2015.
- [52] 仙台市：仙台市震災復興計画，<<http://www.city.sendai.jp/shinsaifukko/shise/daishinsai/fukko/kanren/documents/shinsaifukkokeikaku.pdf>>
- [53] 内閣官房国土強靱化推進室:国土強靱化推進プラン 2016, <[http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo\\_kyoujinka/pdf/ap2016.pdf](http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/pdf/ap2016.pdf)>
- [54] 国土交通省国土地理院応用地理部防災地理課：津波による浸水状況 - 平成 23 年東北地方太平洋沖地震 - ，<<https://www.gsi.go.jp/common/000061103.pdf>>
- [55] 国土交通省東北地方整備局仙台河川国道事務所：仙台湾南部海岸被災の概要，<[http://www.thr.mlit.go.jp/sendai/kasen\\_kaigan/fukkou/pdf/sendaiwanhisai.pdf](http://www.thr.mlit.go.jp/sendai/kasen_kaigan/fukkou/pdf/sendaiwanhisai.pdf)>
- [56] 林野庁：仙台湾沿岸地区における海岸防災林被災概要（写真提供：独立行政法人森林総合研究所），<[http://www.rinya.maff.go.jp/tohoku/koho/saigaijoho/pdf/pamphlet\\_hisaigaiyou.pdf](http://www.rinya.maff.go.jp/tohoku/koho/saigaijoho/pdf/pamphlet_hisaigaiyou.pdf)>

- [57] 仙台市：防災環境都市・仙台，<[https://www.city.sendai.jp/kankyo/shise/gaiyo/soshiki/esakukyoku/link/suishin/documents/bosai\\_panf\\_jpn\\_fix.pdf](https://www.city.sendai.jp/kankyo/shise/gaiyo/soshiki/esakukyoku/link/suishin/documents/bosai_panf_jpn_fix.pdf)>
- [58] 竹内渉，安岡善文：衛星リモートセンシングデータを用いた正規化植生，土壌，水指数の開，写真測量とリモートセンシング，Vol.43，No.6，pp.7-19，2004.
- [59] 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，日本リモートセンシング学会誌，Vol.38，No.5，pp.419-421，2018.
- [60] 宇宙航空研究開発機構：だいち防災ポータル（中国・四国地方での豪雨災害），<<https://dis.bousai.jaxa.jp/disaster/2018-017-JPN/2018-017-JPN.php>>
- [61] 園部雅史，羽柴秀樹：高分解能衛星データを用いた平成 27 年 8 月関東・東北豪雨における浸水域の抽出と精度評価，土木学会，第 72 回年次学術講演会講演概要集（平成 29 年 9 月），IV-137，pp273-274，2017
- [62] 中尾悠士，沢田治雄：高分解能衛星データを用いた津波浸水域把握手法の開発，生産研究，Vol.64，No.4，pp.455-499，2012.
- [63] Aoyama S., Asaka T., Kudou K., and Iwashita K.: Tsunami Damage in the Arama Coastal Forest Interpreted from ALOS Data, *Jornal of Coastal Forest*, Vol.11, No.2, pp.53-58, 2012.
- [64] 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.
- [65] 作野裕司：西日本豪雨災害時における Landsat-8 と Sentinel-1 を使った浸水域の推定，日本リモートセンシング学会，日本リモートセンシング学会誌，Vol.38，No.5，pp.435-437，2018.
- [66] 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/common/000107661.pdf>>
- [67] 国土地理院：平成 30 年 7 月豪雨に関する情報，<<https://www.gsi.go.jp/common/000202540.pdf>>
- [68] 大津展之：判別および最小 2 乗規準に基づく自動しきい値選定法，電子通信学会論文誌，vol. J63-D，No.4，pp.349-356，1980.
- [69] J, XIAO., Y, SHEN., R, TATEISHI. and W, BAYAER., Development of topsoil grain size index for monitoring desertification in arid land using remote sensing, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.27, No.12, pp.2411-2422, 2006.
- [70] Masashi Sonobe, Hideki Hashiba : Improvement of extraction method of flood area using satellite image after disaster and gis data by the 2018.07 heavy rainfall, *International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2019*, pp.9725-9728, 2019.
- [71] Masashi Sonobe, Hideki Hashiba : Characteristics of the distribution of textures in the reconstruction of damaged buildings in the Kumamoto earthquake, *International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2018*, pp.7293-7296, 2018.
- [72] 松岡昌志，山崎文雄：人工衛星 SAR 強度画像による建物被害地域の検出手法，日本建築学会，日本建築学会構造系論文集：Vol.67，No.551，pp.53-60，2002.
- [73] Manabu Watanabe, Rajesh Bahadur Thapa, Tsuneo Ohsumi, Hiroyuki Fujiwara, Chinatsu Yonezawa, Naoya Tomii, and Sinichi Suzuki : Detection of damaged urb

- an areas using interferometric SAR coherence change with PALSAR-2, *Earth, Planets and Space*, 68-131, 2016.
- [74] 大角恒雄, 藤原広, 渡邊学, ラジェッシュ・バハドール・タパ, 富井直弥, 藤谷秀雄 : 2015年ゴルカ, ネパール地震の衛星情報に対するグラウンド・トゥルース -被害分布と旧市街の建物全棟調査 -, 日本地震工学会, 日本地震工学会論文集, Vol.16, No.9, pp.86-99, 2016.
- [75] 園部雅史, 羽柴秀樹 : Cバンド衛星 SAR データを用いたキラウエア火山噴火による地形変化特性の把握, 土木学会, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.74, No.2, II\_86-II\_92, 2018.
- [76] 関根大樹, 桑原祐史, 三尾有年 : 合成開口レーダのコヒーレンス値に着目した都市域における被覆変化域推定方法の検討, 土木学会, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.70, No.2, II\_9-II\_16, 2014.
- [77] 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 : ALOS 全球数値地表モデル (DSM) "ALOS World 3D - 30m (AW3D30)", <[https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/aw3d30/index\\_j.htm](https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/aw3d30/index_j.htm)>
- [78] Copernicus : Emergency Management Service(EMSR335: Tsunami in Indonesia), <<https://emergency.copernicus.eu/mapping/list-of-components/EMSR335/>>.
- [79] Boccard. et al. : Multitemporal SAR Coherence Analysis, Lava flow monitoring case study, 2015 IEEE Intl. Geoscience and Remote Sensing Symposium 2015, pp. 2699-2702, 2015.
- [80] U.S. Geological Survey : Landsat 8 Data Users Handbook ,<<https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook>>
- [81] GLOBAL FOREST WATCH : Land Cover Indonesia, <<https://www.globalforestwatch.org/>>
- [82] 東京大学地震研究所 : 2018年インドネシア・クラカタウ火山噴火・津波, <<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/VRC/krakatau/>>
- [83] 園部雅史, 羽柴秀樹 : 時系列な高分解能衛星画像を用いた仙台海岸沿岸域周辺の復旧過程の評価, 土木学会論文集 B3 (海洋開発) , Vol.74, No.2, pp.I\_139-I\_144, 2018.
- [84] Hideki Hashiba, Masashi Sonobe : Time series evaluation of re-urbanization in disaster area of large-scale tsunami in Japan by high-resolution satellite remote sensing, SPIE Remote Sensing 2018, 10790, 10790DO-1-10790DO-9, 2018.
- [85] Richter R., Schlapfer D., and Muller A. : An automatic atmospheric correction algorithm for visible /NIR imagery, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.27, No.10, pp.2077-2085, 2006.

## 謝辞

はじめに本論文を執筆するに至った防災分野における衛星画像解析および地理空間情報の研究を執筆するに至った私の経緯や経験について述べさせていただきます。

大学1年次には測量実習Ⅰ、Ⅱ、測量学Ⅰ、Ⅱで羽柴秀樹先生と出会い、そして先生を通じて測量学を学び、測量技術が実社会における重要性を学びました。また、基礎ゼミナールで最先端であった衛星リモートセンシングにも触れ、興味を引かれました。大学3年次には測量学Ⅲ、空間情報処理を学び、GPSの新たな利用や地理空間情報の活用について習得しました。就職は、当時建設コンサルタントで衛星運用・観測事業として衛星サービスを先進的に行っていた株式会社パスコに入社しました。持前の運の良さもあり希望であった衛星事業部に配属され、衛星データを活用したアプリケーションの開発などの業務で最先端の技術を包含した業務に従事させていただきました。また、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）に2年間出向し、衛星画像の防災利用に関わる衛星プロジェクトに携わりました。株式会社パスコ、JAXA在籍の頃に全国で活躍する多くの方と出会い、そこで得た経験が今の私の研究の力となっています。株式会社パスコ、JAXA在籍時にお世話になった皆様に感謝の意を表します。また、JAXA出向について推薦していただいた株式会社パスコ衛星事業部部长吉川和男氏には、改めて深く感謝の意を表します。

本論文の執筆にあたりご指導を賜った日本大学教授羽柴秀樹先生には心より感謝を申し上げます。卒業研究生として先生の下でご指導を賜り始めて以来、大学を卒業し、株式会社パスコを経て助手として大学に勤務する今日に至るまで、研究指導はもとより、研究者、教育者としての基礎をお教えました。改めて深く感謝の意を表します。本論文の審査をご快諾いただきました日本大学教授大沢昌玄先生、同教授杉村俊郎先生には貴重なコメントを賜ると同時に、本論文を含め研究に対する数々のご助言を賜りましたこと深く感謝いたします。

平成29年度まで日本大学非常勤講師であられました秋葉法昌先生、上杉滋先生には助手着任当初から教育の基本をお教えました。先輩でもある先生方の背中から多くのことを学びました。また、同非常勤講師の志水茂先生、丸本和徳先生には本論文の執筆や学会参加に当たり多大なるご協力をいただきました。本当にありがとうございました。

本論文の執筆背景には企業や研究開発法人の勤務時代の経験に基づくところが多くあります。企業を退職するに当たりまして多大なるご迷惑をお掛けしたと同時に大学勤務を暖かく見守っていただきました株式会社パスコ常務執行役員伊東英夫氏、衛星事業部副事業部長加藤裕之氏、同部長吉川和男氏、同副部長石岡義則氏、同副部長寶楽裕氏、柴山卓史氏、末廣明生氏、野中崇志博士（現日本大学准教授）には深く感謝いたします。また、同僚であった草野駿一博士、佐藤祥人氏、三五大輔氏、木村詩織氏には業務だけではなくプライベートでもお世話になりました。本当にありがとうございました。今や全国で活躍されている同期入社の皆には多大なる活力とエールをいただきました。本当にありがとうございました。

JAXA在職時にプロジェクトの進め方などを懇切丁寧にお教えました JAXA 内藤一郎氏、戸田謙一氏、宮崎景太氏（現三菱電機株式会社）、石野達哉氏（現一般財団法人リモートセンシング技術センター）、櫻井洋祐氏（現 ESRI Japan）には大変お世話になりました。

研究室の同窓生である石濱侑起氏、中川大輔氏、丸本和徳氏及び研究室に在籍し研究活動に勤しんだ同期及び修了生、卒業生の皆様、本当にありがとうございました。

最後に厳しくもいつも暖かく見守ってくれる両親、優しく接してくれた祖父母、いつも応援してくれる妻子、親戚一同の皆様には心から感謝申し上げます。

令和元年9月  
園部 雅史