

様式第 11 別紙 2

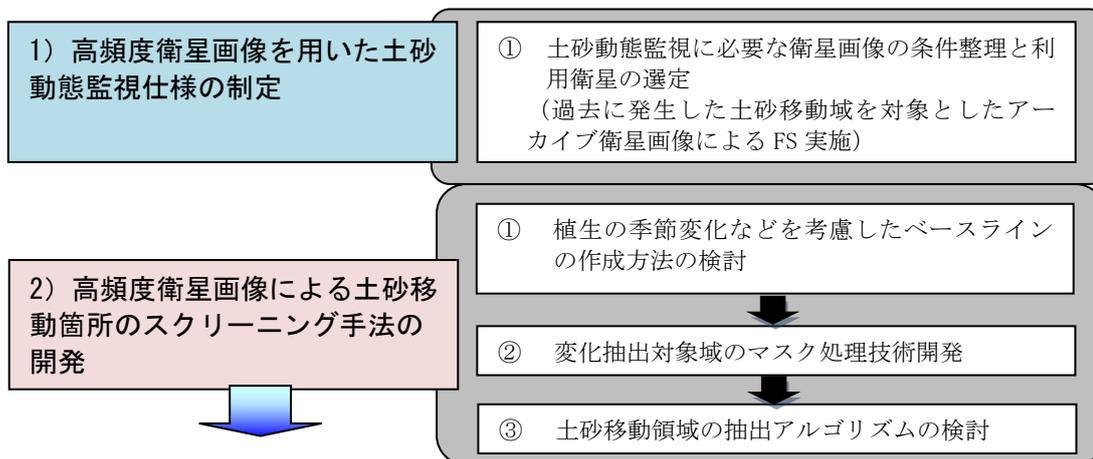
建設技術研究開発費補助金 総合研究報告書

- (1) 課 題 名：衛星監視カメラによる広域土砂動態監視手法の開発
- (2) 研 究 期 間：平成 29～30 年度
- (3) 交 付 申 請 者 名：織田和夫（アジア航測株式会社 総合研究所・所長）
- (4) 研 究 代 表 者 名：船越 和也
（アジア航測株式会社 国土保全コンサルタント事業部・副事業部長）
注）平成 29 年度は交付申請者が研究代表者
- (5) 共 同 研 究 者 名：金田 真一（アジア航測株式会社・課長）
角田 里美（アジア航測株式会社・主任技師）
長尾(服部) 聡子（アジア航測株式会社・技師）
有安 恵美子（アジア航測株式会社・技師）
金 宗煥（アジア航測株式会社・主任技師）
松田 昌之（アジア航測株式会社・技師）
屋木 わかな（アジア航測株式会社・技師）
太井 正史（アジア航測株式会社・技師）
宮下 直己（株式会社アクセルスペース・最高技術責任者）
池田 義太郎
（株式会社アクセルスペース・事業開発・営業グループ長）
星 良（株式会社アクセルスペース・営業グループ所属）
山谷 修平
（株式会社アクセルスペース・事業開発・営業グループ所属）
- (6) 補助金交付総額：8,957,000 円
- (7) 技術研究開発の目的
本研究開発は、平成 29 年度から平成 30 年度までの 2 か年を通じて、高頻度衛星監視カメラによる土砂移動監視体制を構築し、同技術による土砂移動箇所のスクリーニングの実用化を目的とした。
- (8) 技術研究開発の内容と成果
大規模な地震や豪雨等により広域で土砂移動が想定される場合には、土砂発生源となる山地斜面の崩壊状況等を速やかに確認する必要がある。このとき、広域で同時多発的な土砂災害の発生状況を効率的に把握する手法として航空機を用いた空中写真撮影・判読が有効であるが、より広範囲を迅速に画像確認する手法として、高解像度化と高頻度撮影化が進む光学衛星の活用も進んでいる。光学衛星は、災害後の天候不良や山間部での雲や霧の発生などの影響を受ける場合が多いものの、多数の衛星群による高頻度撮影が可能となったことから、雲間で撮影された画像の収集と活用が期待される状況となっている。
このような背景から、超小型衛星による光学画像を活用した土砂移動監視を、平常時と緊急時での利用面を整理し、必要となるデータの蓄積方法と提供方法を検討するとともに、運用体制に向けた監視シナリオ（案）をとりまとめた。
また、高頻度に観測された光学衛星画像群から、土砂移動域の発生概況とその分布を迅

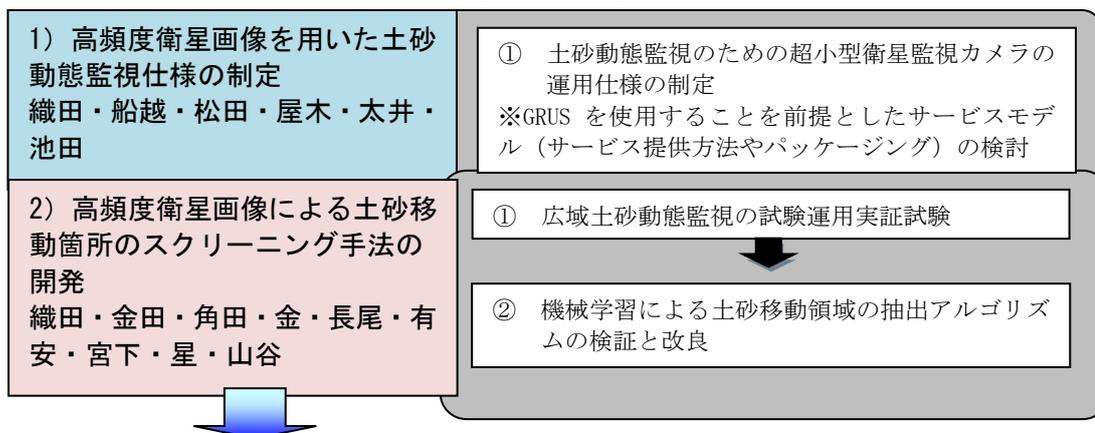
速に把握する手法として、災害発生前後の画像比較や機械学習を用いた土砂移動箇所の自動抽出手法を検討した。

本研究開発の全体フローは図 1 の通りである。

フェーズ 1 : 衛星監視カメラによる土砂動態スクリーニング手法の開発 (H29 年度)



フェーズ 2 : 衛星監視カメラの実証実験(H30 年度)



平成30年度以降

フェーズ 3 : 実用化へ

図 1 全体フロー

平成 29 年度（初年度）の実施内容と成果は以下の通りである。

①高頻度衛星画像を用いた土砂動態監視体制の構築

過去に発生した土砂災害の履歴から試験サイトを選定し、災害前後のアーカイブ衛星画像による土砂移動域を対象とした FS を実施する。その結果を受けて、衛星監視カメラの運用体制を構築し、専門家の知見を付加したサービスの提供方法やパッケージ化などの検討を行う。

②高頻度衛星画像による土砂移動箇所のスクリーニング手法の開発

植生の季節変化などの影響を考慮した平常時のベースライン(変化前の基準となる画像)を作成する。変化領域(土砂移動領域)を効率よく抽出するために、画像間の幾何補正、雲域の抽出およびマスク処理手法など、土砂動態監視カメラとして必要な要件を検討・開発する。また、衛星監視カメラによる広域土砂監視の運用を実施し、機械学習等を用いた土砂移動領域の自動抽出に用いることができるアルゴリズムを開発する。

(2) 技術研究開発の内容と成果

① 高頻度衛星を用いた土砂動態監視体制の構築

①-1 土砂動態監視に必要な条件整理と利用衛星の選定

土砂動態監視に必要な衛星画像の条件として、1) 5m以下の分解能を有すること、2) 高頻度観測(ほぼ毎日)ができること、3) 比較的安価で入手できること等、一定の条件を満たす衛星画像を表 1 のように整理した。その中で日本の GRUS (アクセルスペース社) と米国の PlanetScope (Planet Labs 社) が、本研究の目的に適していると判断した。ただ GRUS 衛星は現在打ち上げ準備中であることから、今回の研究では Planet Labs 社の PlanetScope を選定した。表 2 に GRUS と PlanetScope の性能比較、表 3 に両者のコスト比較を示す。

表 1 主な光学衛星の諸元

衛星名	国	センサー			地上解像度	再訪日数	価格(km ² 当たり)	備考
		RGB	近赤外	赤外				
PlanetScope	米	○	○		3m	1日	260円(年間基本使用料120万円)	• 200機以上コンステレーション
GRUS	日	○	○		2.5m	1日	150円	• 2017年度打ち上げ予定(3機) • 2020年までに50機を予定
ほどよし1号	日	○	○		6.7m	6日	—	• 実験運用
RapidEye	独	○	○		5m	1日	220円	• 5機コンステレーション • 最小購入面積(アーカイブ: 500km ² 、タスキング:3,500km ²)
SkySat	米	○	○		0.8m	3.5日	アーカイブ:1,300円 ~2,000円 新規撮影:2,000円 ~3,000円	• 7機コンステレーション(2018年までに13機) • 最小注文金額(アーカイブ:65千円~100千円、新規撮影:100千円~150千円)

表 2 性能比較

	GRUS	PlanetScope
運営企業	アクセルスペース	Planet Labs
地上分解能	2.5m	SSO軌道: 3.7m ISS軌道: 3.0m
再訪頻度	1回/1日 3機の場合: 40度以下の撮影角度 50機の場合: 全直下視可能	1回/1日 常に直下視
撮影幅	57km以上	16.4km
撮影時刻	11時前後	SSO軌道: 9:30-11:30 ISS軌道: 特定無し

表 3 コスト比較

		GRUS	PlanetScope
年間基本使用料		無し	1,200,000円
単価 (/km ²)	アーカイブ	150円(予定)	260円
	新規	150円(予定)	260円
撮影箇所		Web画面上で柔軟に変更可能	2地点に契約時に固定

①-2 テストサイトの選定

近年、豪雨に伴い深層崩壊を含む多様な土砂災害が発生し、本業務で利用予定の PlanetScope が近赤外画像を取得している平成 29 年 7 月九州北部豪雨に伴う福岡県朝倉市周辺のテストサイトとして選定した (表 4)。

表 4 試験サイト候補一覧

No.	豪雨名称	災害発生	航空写真撮影 (国土地理院)	主な対象地域	土砂災害現象			衛星光学センサー (災害時)		評価
					深層崩壊	表層崩壊		可視	近赤外	
						河道閉塞				
1	平成29年7月九州北部豪雨	7月5日	7月11日	福岡県朝倉市	○	○	○	○	○	◎
2	平成28年4月熊本地震後の豪雨(6月)	6月19日	7月5日	熊本県阿蘇地方	○	△	○	○	○	○
3	平成26年8月豪雨	8月20日	8月20日	広島県広島市	×	×	○	○	×	×
4	平成23年台風12号に伴う豪雨	9月4日	9月6日	紀伊半島	○	○	○	○	×	△

衛星画像利用の契約範囲は、Planet Labs 社のライセンス利用料等を踏まえ、1,000km²程度である (図 2 の黄枠範囲)。そのうち、今回使用する試験サイトは、平成 29 年 7 月九州北部豪雨に伴う土砂災害が発生した約 289km²とした (図 2 の赤枠範囲)。この範囲は、国土地理院による空中写真撮影範囲と重複する。

本範囲では、使用可能な画像は 2016 年 11 月～現在のアーカイブ画像すべてであり、契約期間中は新規撮影画像が随時追加される。

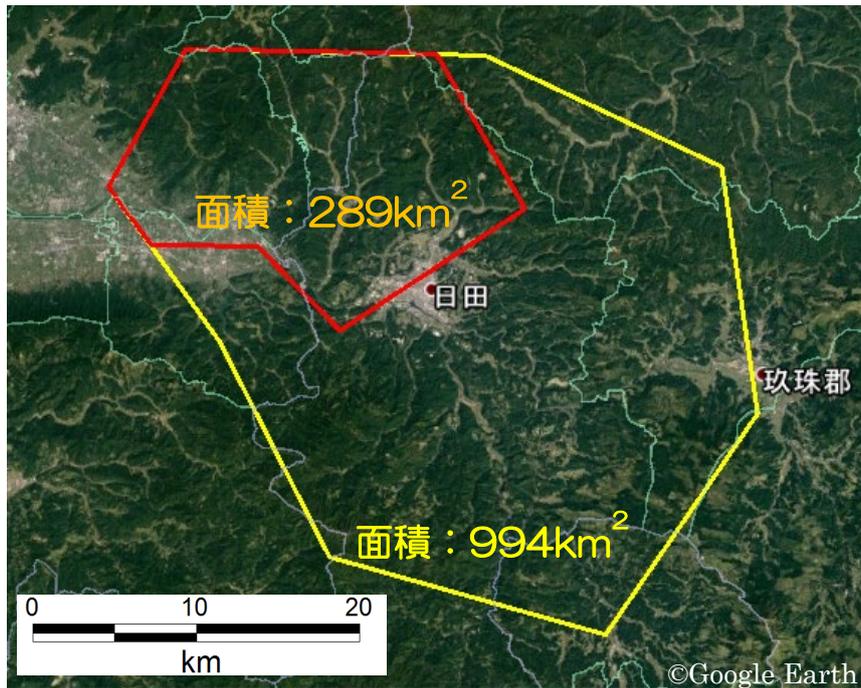


図 2 PlanetLabs 画像契約範囲

①-3 フィージビリティスタディ

①-3-1 位置精度の確認

土砂移動域抽出精度に影響すると考えられる画像間の相対的な位置精度を確認した。災害前の画像 (2017/6/15 撮影) をリファレンス画像とし、災害後の画像 (7/20, 7/30, 8/22) の位置ずれがどの程度あるかを検証した。評価では不動点と考えられる道路上に基準点を 20 点程度設定後、位置ずれを計測し、平均二乗誤差平方根 (RMSE) を算出した。平地と山間地では位置精度が異なると考えられるため、平地と山間地を分けて評価した。基準点の配置状況を図 3 に示す。

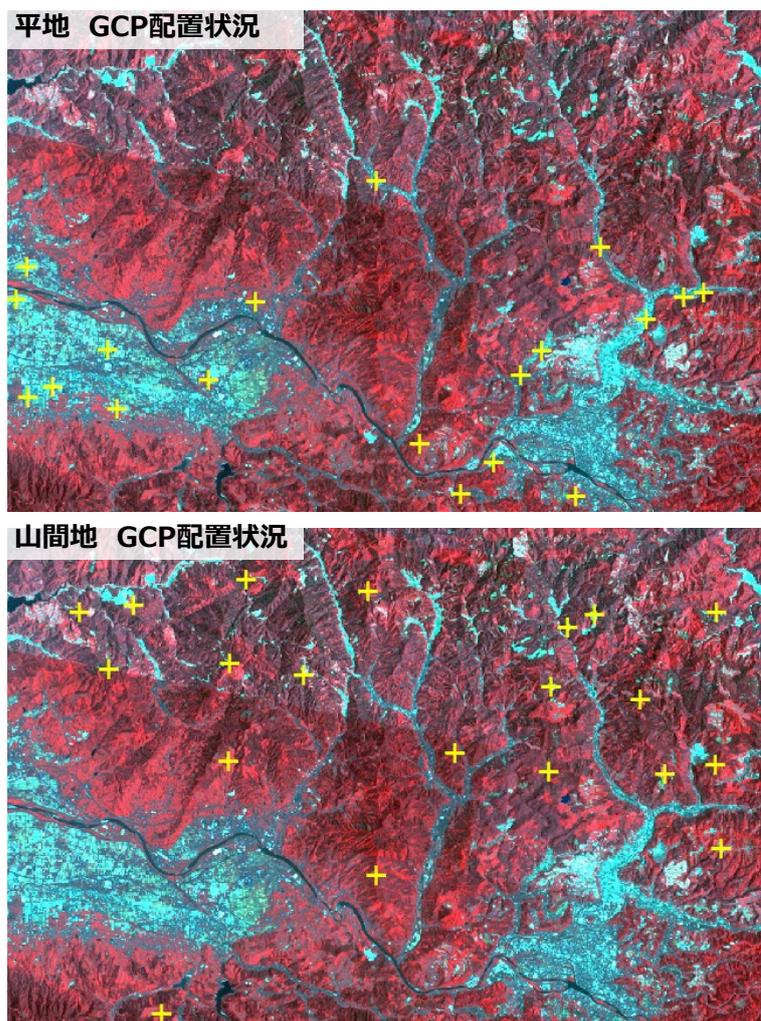


図 3 基準点配置状況

その結果、平坦地では1画素以内(2~3m)、山間地では1~2画素程度(3~6m)の位置精度を有していることが示された(図4)。ここでは、1画素を3mとして換算している。

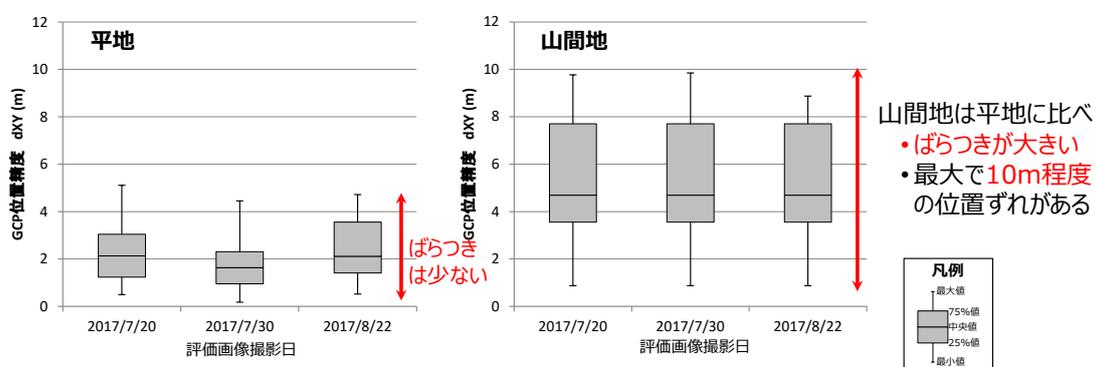


図 4 衛星画像の位置精度結果

土砂災害の発生域となる斜面では、地形による歪み等で位置精度が低下するため、位置ずれにばらつきがあり、最大で10m程度のずれが生じる場合がある。誤差影響が生じやす

い要因として雲の影響がある。雲が多いと GCP の自動取得が困難になり、位置精度が悪くなると考えられる(図 5)。

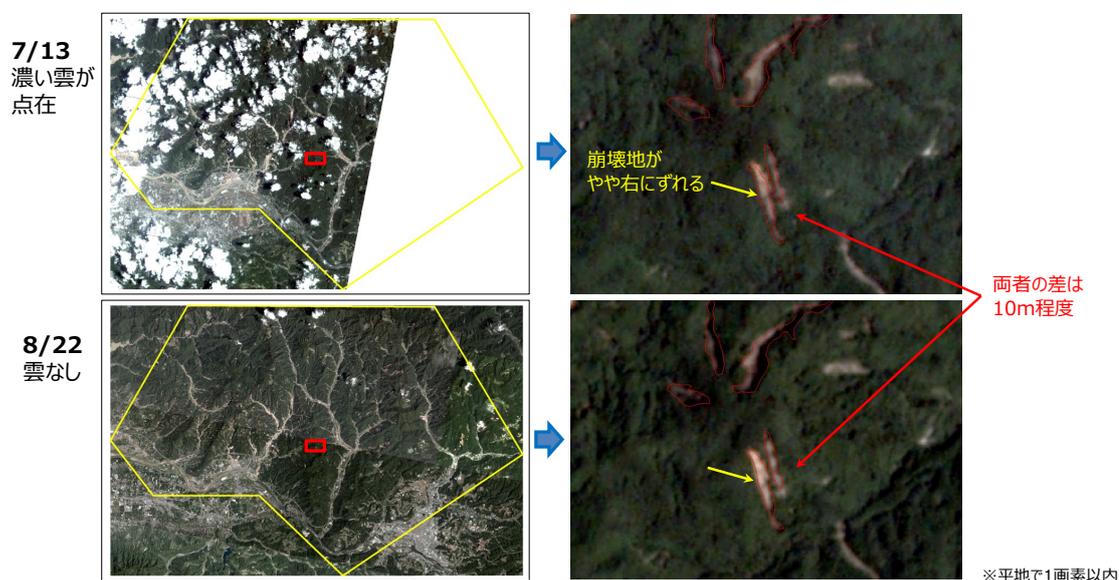


図 5 位置ずれが見られる例

①-3-2 可視性の確認

国土地理院による航空写真判読に基づく九州北部豪雨に伴う土砂移動域のポリゴンデータを、晴天時及び薄雲時の衛星画像に重ね合わせて、判読可能な崩壊規模等の把握を行った。把握に当たっては、災害後の比較的雲が少なく、領域全体の画像が取得されている画像を選定した。

その結果、次のことが分かった。

- ・幅 15m 程度の小さな崩壊地が判読可能 (図 6 の 1 段目・2 段目)
- ・土砂移動域は判読可能。流送域・堆積域等の区別は困難 (図 6 の 3 段目・4 段目)
- ・縮尺 1/2,000 程度の判読が可能
- ・土砂移動域の位置・形状も空中写真を用いた判読結果とよく一致し、土砂移動域の把握にあたっては十分な位置精度を持っていると考えられる

以上より、PlanetScope 画像は土砂移動域の判読に十分活用できることがわかった。GRUS では解像度がさらに上がるため、より高精度に判読ができると考えられる。

また、災害前後を比較することで、土砂移動域を精度よく効率的に判読できると期待される。

【崩壊密集域】 (1/10,000相当)



災害前(6/15)

災害後(7/13-14)

災害後(7/13-14) 土砂移動域重ね図

崩壊の密集域でも比較的容易に判読可能

【小規模崩壊】 (1/2,500相当)



災害前(6/15)

災害後(7/13-14)

災害後(7/13-14) 土砂移動域重ね図

幅15m程度の小規模崩壊が判読可能

【土石流(流送域)】 (1/10,000相当)



土砂移動域は判読可能であるが、流送域と堆積域の区別はやや困難



堆積域では谷幅が広く輝度が高くなりやすいため、比較的容易に判読可能であるが、流送域との境界判別はやや困難

図 6 土砂移動形態による見え方の比較

①-3-3 雲域がある場合の運用方法の検討

晴天時の赤バンドと NDVI 画像により崩壊地を薄雲域における崩壊地でも判読が可能であることを確認した (図 7)。

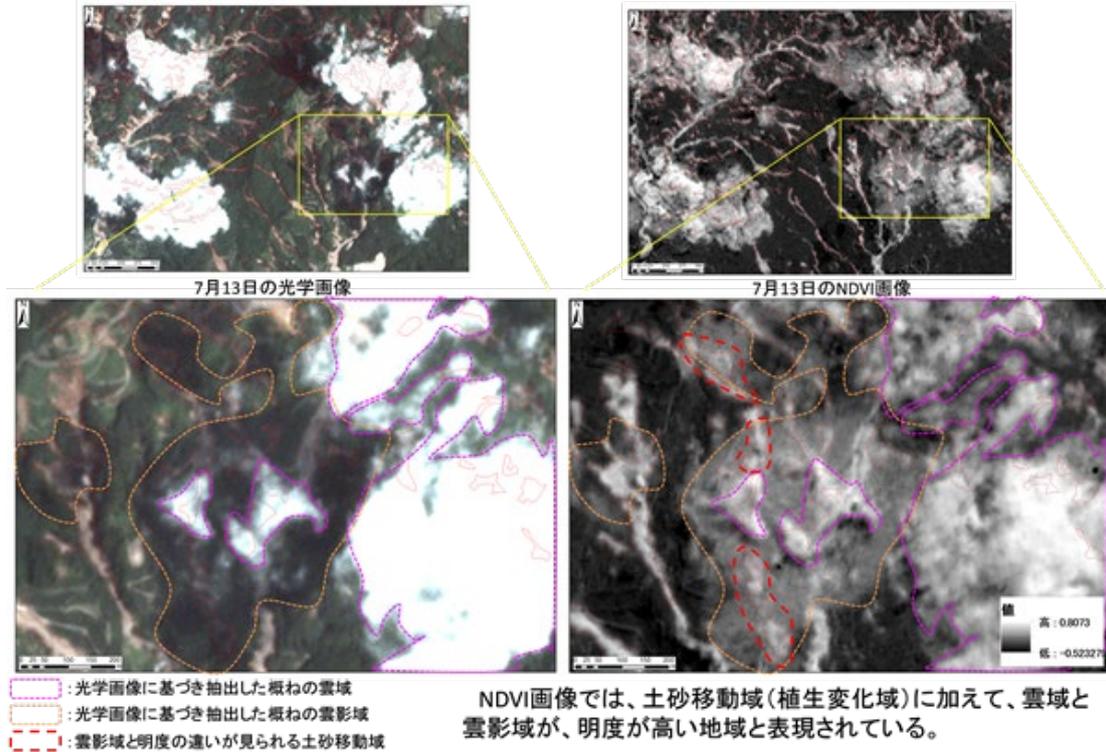


図 7 光学画像と NDVI 画像の見え方の違い

また、災害後の衛星光学画像による判読可能域の変化を把握するため、対象範囲の撮影率と雲域の割合 (雲率)、地表撮影率の推移を整理した (図 8)。平成 29 年 7 月九州北部豪雨の場合、発災後 10 日程度でほぼ全域の情報が得られることが確認された。

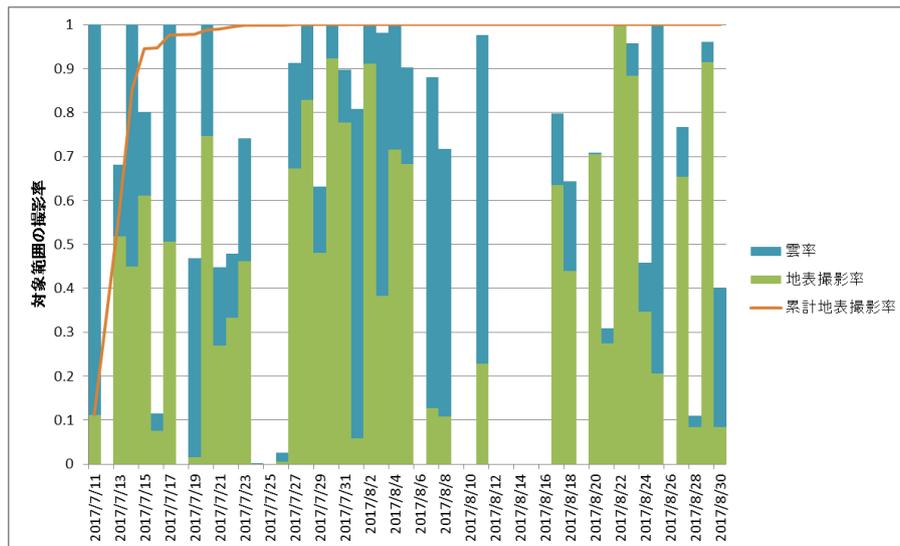
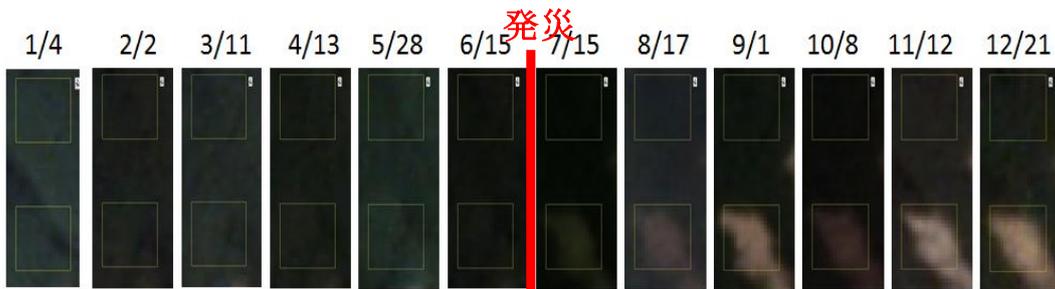
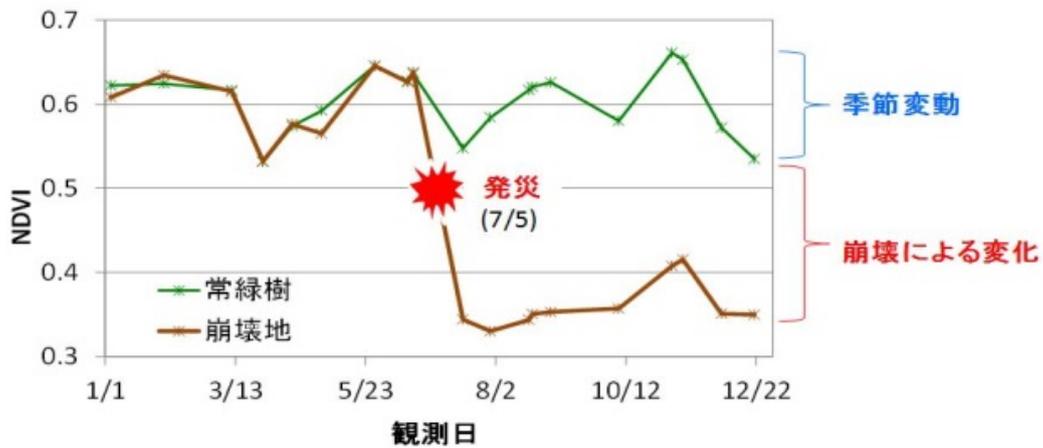


図 8 対象範囲の地表撮影率の推移

②高頻度衛星画像による土砂移動箇所のスクリーニング手法の開発

②-1 植生の季節変化などを考慮したベースラインの作成方法の検討

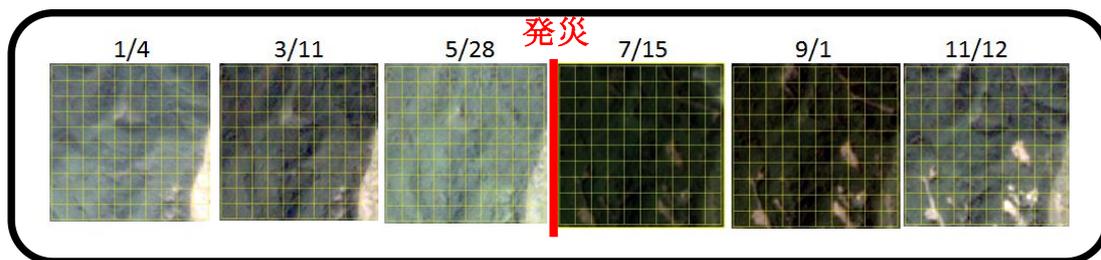
土砂移動箇所を過去画像と最新画像の比較によって抽出する場合は、比較画像間で植生の季節変化が同等程度であることが望ましい。そこで、どの程度の画像を比較の基準画像（ベースライン）として蓄積するのがよいかを検討するため、2017年1月から12月までに撮影された常緑針葉樹エリアを対象に、崩壊発生の有無による画像の経時変化(NDVI)を解析した(図9)。非崩壊エリアは、季節や観測時の大気などの影響を受けて小幅の変動を示したが、崩壊エリアは発災後、植生域が裸地に変わったことによってNDVIが大幅に減少した。ベースライン作成のための参照画像は、季節変動と大量のデータ蓄積に伴うコストなどのバランスを考慮し、2カ月毎に蓄積しておくことが有効と結論した。



非崩壊エリア（上）と崩壊エリア（下）

図9 NDVI経時変化（上）と光学画像の変遷（下）

試験的に構築したベースライン画像を以下に示す。50mメッシュ（500m×500m）の画像を2カ月毎に用意した(図10)。7月に発生した土砂災害による崩壊地を抽出するために、発災2カ月前の5月に取得された画像を用いた。変化領域の抽出結果から、メッシュ内の崩壊面積に応じて3段階（赤：大規模、黄：小規模、雲域を含む）の評価を行った。



ベースライン画像構築の例

図 10 ベースライン画像構築例

②-2 変化抽出対象域のマスク処理技術開発

変化抽出対象域は、雲域を自動抽出し、それ以外の部分が対象となる。雲域の自動抽出は、既にアクセルスペース社で開発済みのほどよし1号衛星画像の雲抽出に用いた機械学習による雲域抽出を PlanetScope 画像に適用した(図 11)。輝度の高い雲域でサチュレーションがあり抽出できない部分があったため、その部分を考慮した抽出方法を構築することにより、雲域を自動的に抽出できるようになった(図 12)。

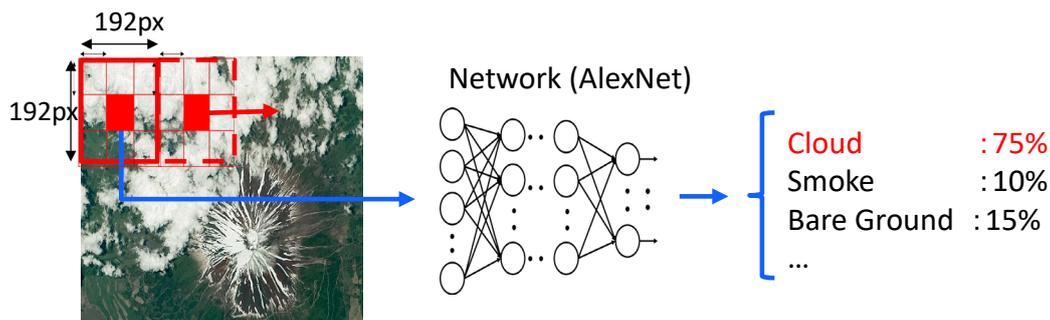


図 11 雲域自動抽出フロー

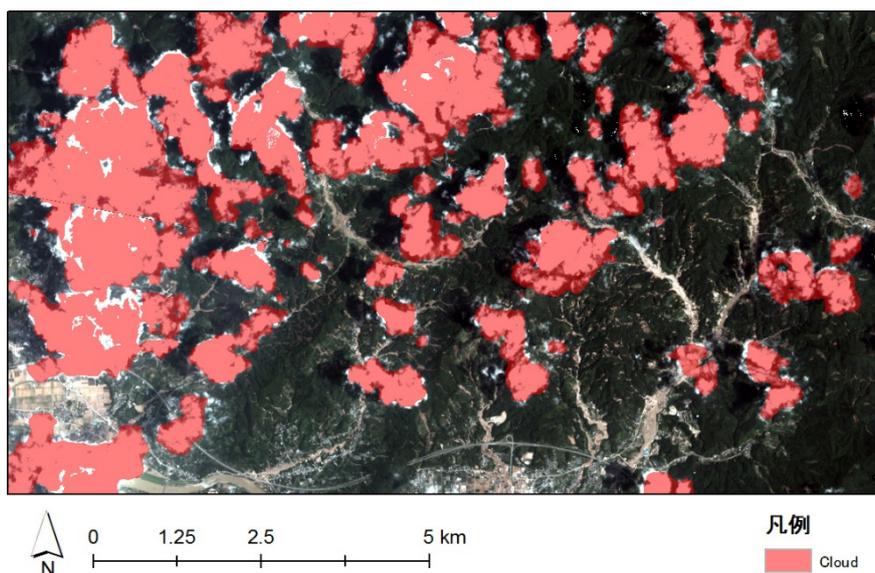


図 12 雲域抽出結果例

②-3 土砂移動領域の抽出アルゴリズムの検討

土砂移動域の自動抽出手法として、1) 災害前（ベースライン含む）の画像と災害後の画像のバンドの輝度値等の比較による差分抽出と、2) 深層学習による抽出の2手法により土砂移動候補域の絞り込みを行い、スクリーニングを行う方法を検討することとした。

②-3-1 災害前後の画像の比較による差分抽出

平成 29 年 7 月九州北部豪雨の被災地となった福岡県朝倉市を対象に、太陽高度が異なる複数の PlanetScope 画像を用いて、差分抽出における放射量補正の効果の確認を行うとともに、差分に用いる値として、裸地を把握しやすい赤バンドと NDVI（正規化植生指数）の2種類を比較し、NDVIの方が安定的に土砂移動候補域を抽出可能であり、抽出精度が高いことを確認した（図 13、図 14）。また、放射量補正後に残る、2 画像間の気象条件の違いに起因する輝度値の違いを補正する方法として、簡便に適用できる Empirical Line 法を検討した結果、観測日の違いによって見られた抽出結果のばらつきが改善し、より安定的に土砂移動候補域を抽出できることを確認した（図 15）。さらに、比較可能な季節差の限界を把握するため、災害前の1年間から季節差が大きい時期を含む7時期の画像を選定し、前述の検討手法を適用して災害後の画像との差分抽出を実施した。その結果、基本的には、いずれの季節を使用した場合も抽出が可能であるが、冬～春の画像と夏の画像の差分を行った場合は一方の画像の植生フェノロジーや地形の陰影効果の影響を受け、抽出精度が低下することを確認した（図 16）。

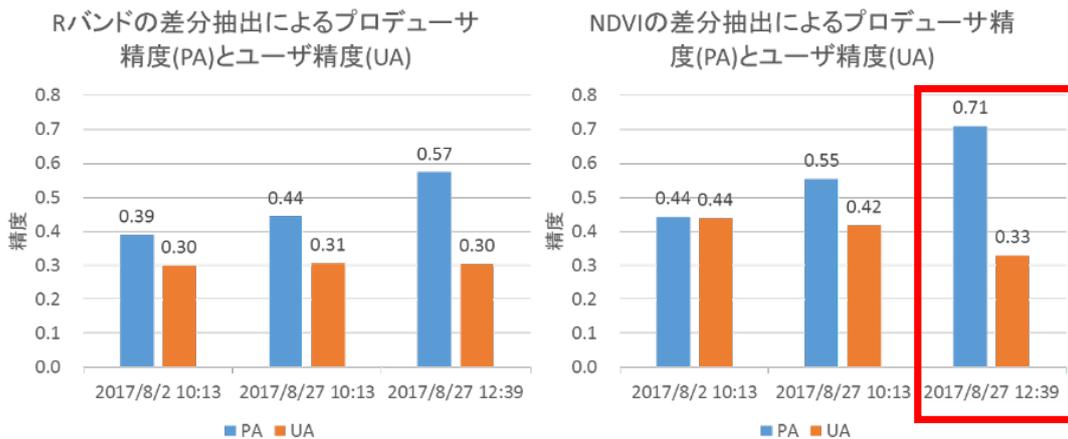


図 13 太陽高度が異なる画像を用いた土砂移動候補域の抽出精度

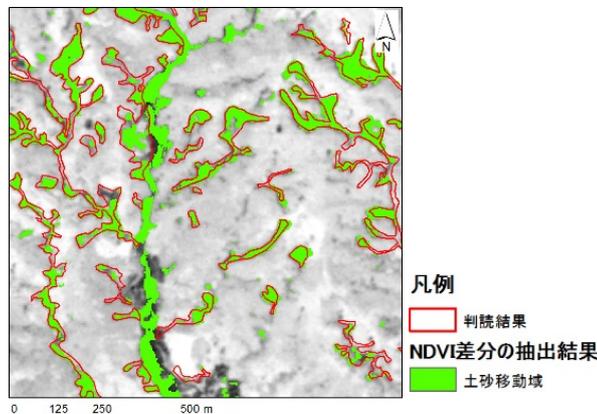


図 14 NDVI の差分抽出の結果の例

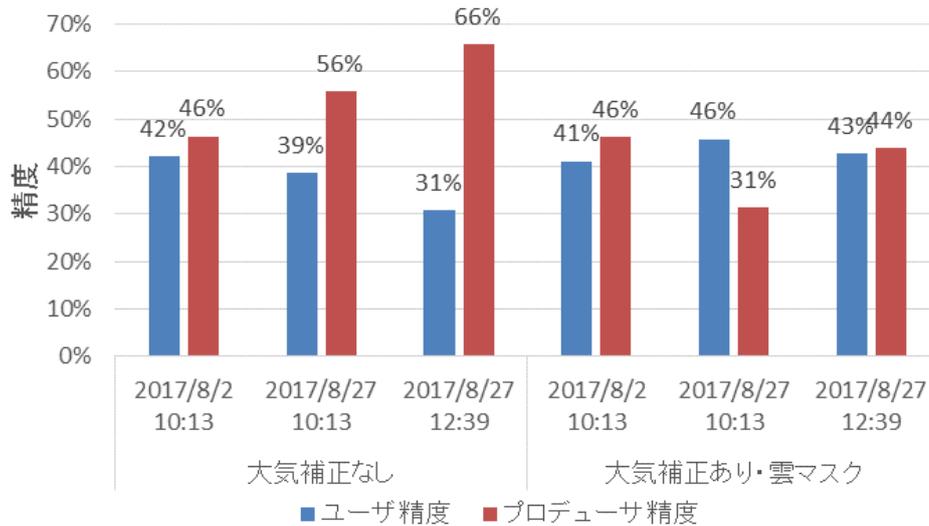


図 15 大気補正の実施の有無の比較
(土砂移動候補域の抽出精度)

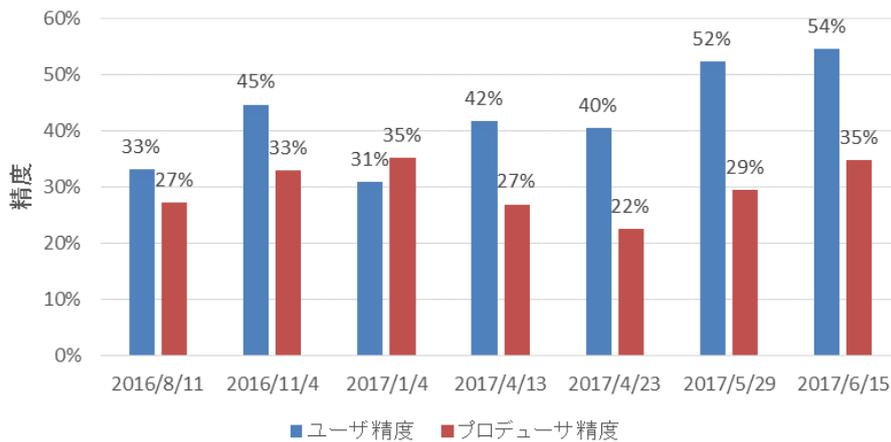


図 16 災害前画像の季節の比較
(土砂移動候補域の抽出精度)

②-3-2 深層学習による抽出

本検討では、以下の2つの方針で検討を行った。

- 1) 震災後の画像と土砂移動域のトレーニング用のデータを用いて深層学習により画像の特徴を学習させ、震災後の単独の画像から土砂移動域を推定する方法
- 2) 深層学習により震災前後の画像の土地被覆分類を行い、変化域を抽出する方法

前者については、比較的少ないサンプル数で学習が可能な pix2pix と呼ばれる深層学習のアルゴリズムを用いることとし、震災後の衛星画像として、裸地を把握しやすいフォーカスカラー合成画像、土砂移動域の画像として、判読結果のポリゴン内とその他の領域を2色で塗り分けたラベル画像を用いた。また、対象領域を東西に2分割して一方をトレーニング用、他方を検証用として用いた。その結果、NDVI の差分抽出よりも抽出漏れが少ない(図 17)ことや、差分抽出で生じる河川敷の誤抽出が認められない(図 18)などの良好な傾向を示す一方で、抽出漏れの原因が特定できないことが課題となった。

後者については、AlexNet と呼ばれる CNN モデルを応用し、予めほどよし衛星画像を用いて学習済みの「Cloud」、「Smoke」、「Bare Ground」、「Vegetation」、「Urban/Built-up Area」、「Snow/Ice」、「Waterbody」に分類可能なモデルを本対象領域の PlanetScope 画像へ適用した。その結果、必ずしも誤抽出とは言えないものの、判読結果と抽出面積の規模に明らかな乖離が認められ（図 19）、実効解像度の 2~4 倍の大きさの変化しか抽出できないことが課題となった。

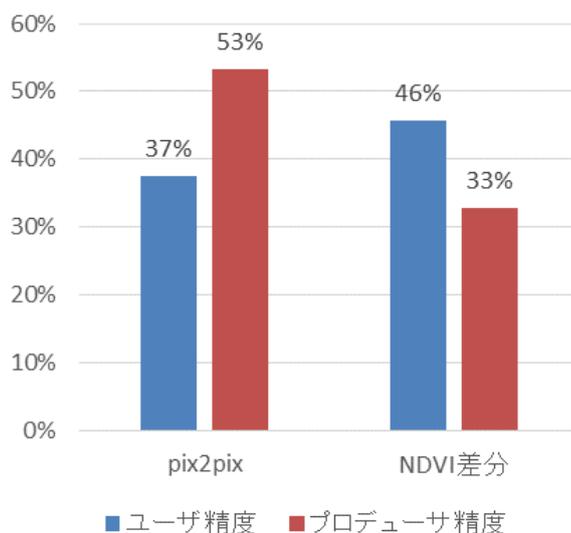


図 17 pix2pix による単独抽出と NDVI の差分抽出の比較
(土砂移動候補域の抽出精度)

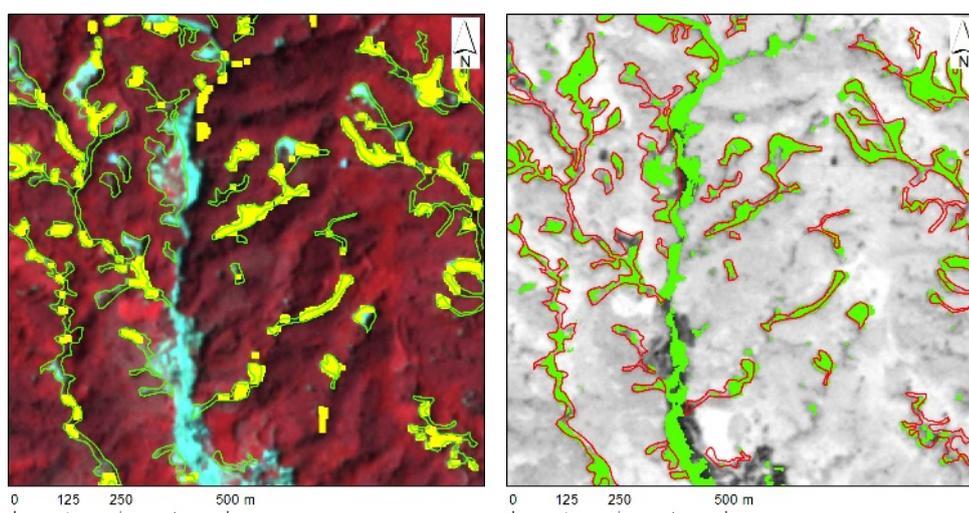


図 18 pix2pix による単独抽出と NDVI の差分抽出の例

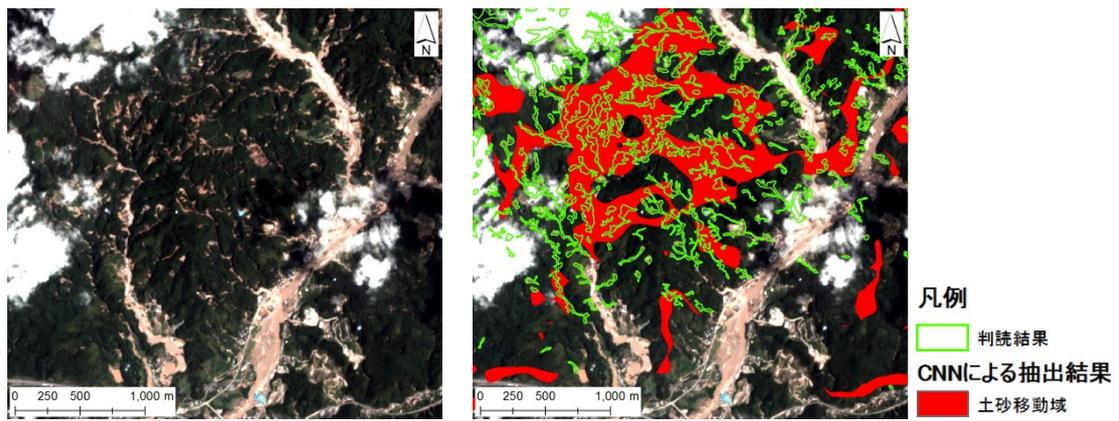


図 19 CNN による変化抽出の例（左：トゥルーカラー画像、右：抽出結果）

平成 30 年度（最終年度）の実施内容と成果は以下の通りである。

1) 高頻度衛星を用いた土砂動態監視仕様の制定

①土砂移動監視のための超小型衛星監視カメラの運用体制の制定

大規模な地震や豪雨等により広域で土砂移動が想定される場合には、土砂発生源となる山地斜面の崩壊状況等を速やかに確認する必要がある。このとき、広域で同時多発的な土砂災害の発生状況を効率的に把握する手法として航空機を用いた空中写真撮影・判読が有効であるが、より広範囲を迅速に画像確認する手法として、高解像度化と高頻度撮影化が進む光学衛星の活用も進んでいる。光学衛星は、災害後の天候不良や山間部での雲や霧の発生などの影響を受ける場合が多いものの、多数の衛星群による高頻度撮影が可能となったことから、雲間で撮影された画像の収集と活用が期待される状況となっている。

このような背景から、超小型衛星による光学画像を活用した土砂移動監視を、平常時と緊急時での利用面を整理し、必要となるデータの蓄積方法と提供方法を検討するとともに、運用体制に向けた監視シナリオ（案）をとりまとめた。

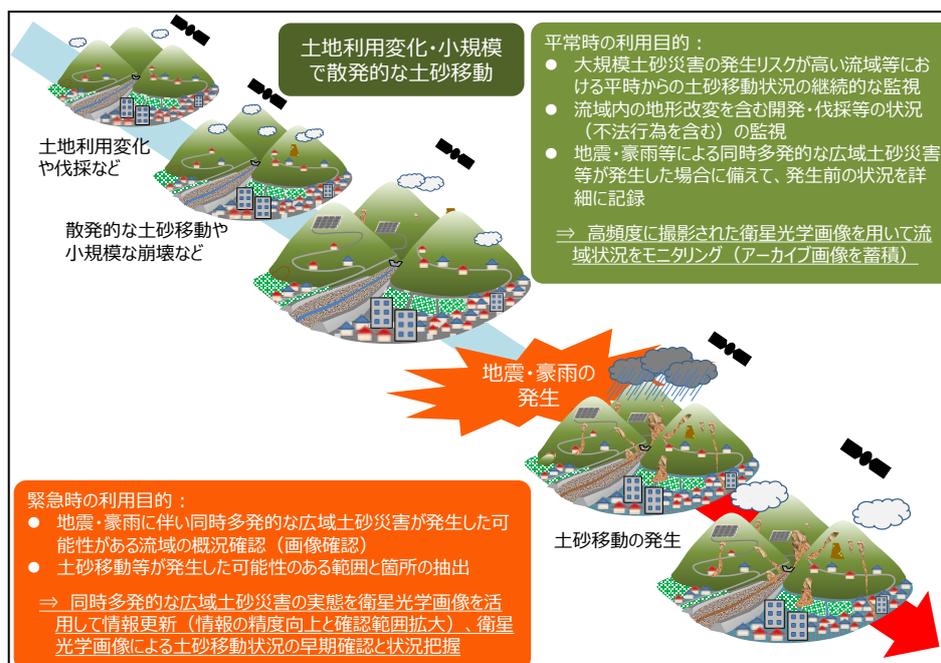


図 20 土砂移動監視のための超小型衛星監視カメラの位置づけと運用方針（案）

(1) データ蓄積方法とデータ提供方法

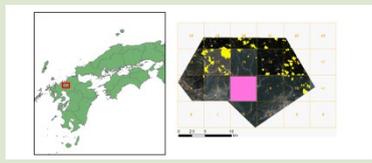
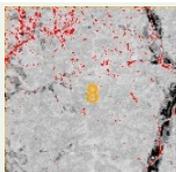
プロダクト	内容	イメージ
アラート	土砂移動等の可能性のある場所が発見された場合、自動的に利用者にメール等でアラートを発する。	
変化領域図	アラートとともに、5km メッシュの図面上で変化の可能性の高い場所を図示	 変化領域 (5km メッシュ)

図 21 通常時：変化領域発見に向けたデータの蓄積と提供

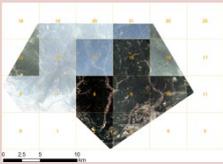
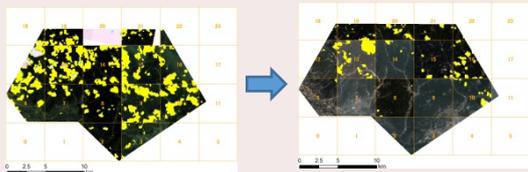
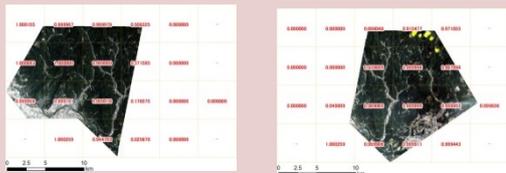
プロダクト	内容	イメージ
①最新モザイク画像 (発生前)	要請範囲内の事象発生直前の雲の少ないモザイク画像を、要請後速やかに提供する。	 災害前画像
①最新モザイク画像 (発生後)	日々の取得画像が蓄積されたタイミングで、事象発生後の一定期間のうちの雲の少ないモザイク画像を提供する。	 災害後画像 (日々更新)
②撮影画像の提供	要請範囲の日々の取得画像を提供する。	

図 22 緊急時：災害前後の即時画像提供に向けたデータの蓄積と提供

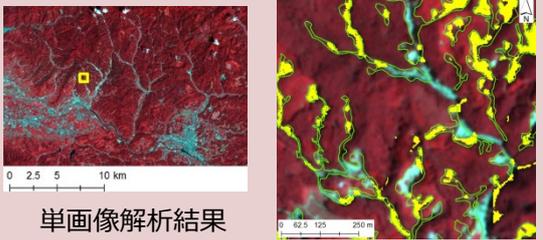
プロダクト	内容	イメージ
③自動変化領域抽出結果図 (単画像検証)	災害後の単画像を用いて深層学習を用いた抽出技術により土砂移動の可能性がある領域を抽出し、その結果図を提供する。	 <p>単画像解析結果</p>
③自動変化領域抽出結果図 (前後比較による検証)	災害前後の画像を用いて、差分解析および深層学習を用いた抽出技術等を組み合わせより信頼性の高い土砂移動の可能性がある領域を抽出し、その結果図を提供する。	 <p>災害前後の差分解析も含めた抽出結果</p>
④技術者判読による土砂移動分布図	災害前後の画像を用いた自動抽出結果に加え、技術者判読による補正等を行った土砂移動分布図を提供する。	 <p>技術者による判読結果を反映した図</p>

図 23 緊急時：土砂移動による変化領域自動抽出結果の蓄積と提供

(2) 監視シナリオ

光学衛星画像は、結果解釈が比較的容易であることから、悪天候時や夜間等の条件下で活用される SAR 画像と相互補完的に活用していくことも有効と考える。

また、高頻度に衛星観測が可能となりつつあるものの、雲域の少ない画像をタイムリーに取得することができない場合やより詳細な情報を取得するためには、航空機を用いた空中写真撮影やレーザ計測を併用することも重要である。

土砂災害時には、早期に概況を把握することが求められることから、これらの様々な手法と相互補完的に運用していく必要があり、また、高頻度光学衛星で得られた画像を迅速に関係機関にデータ提供しつつ、土砂移動域の把握などを段階的に進めていく方法を検討し、監視シナリオ案としてとりまとめた。

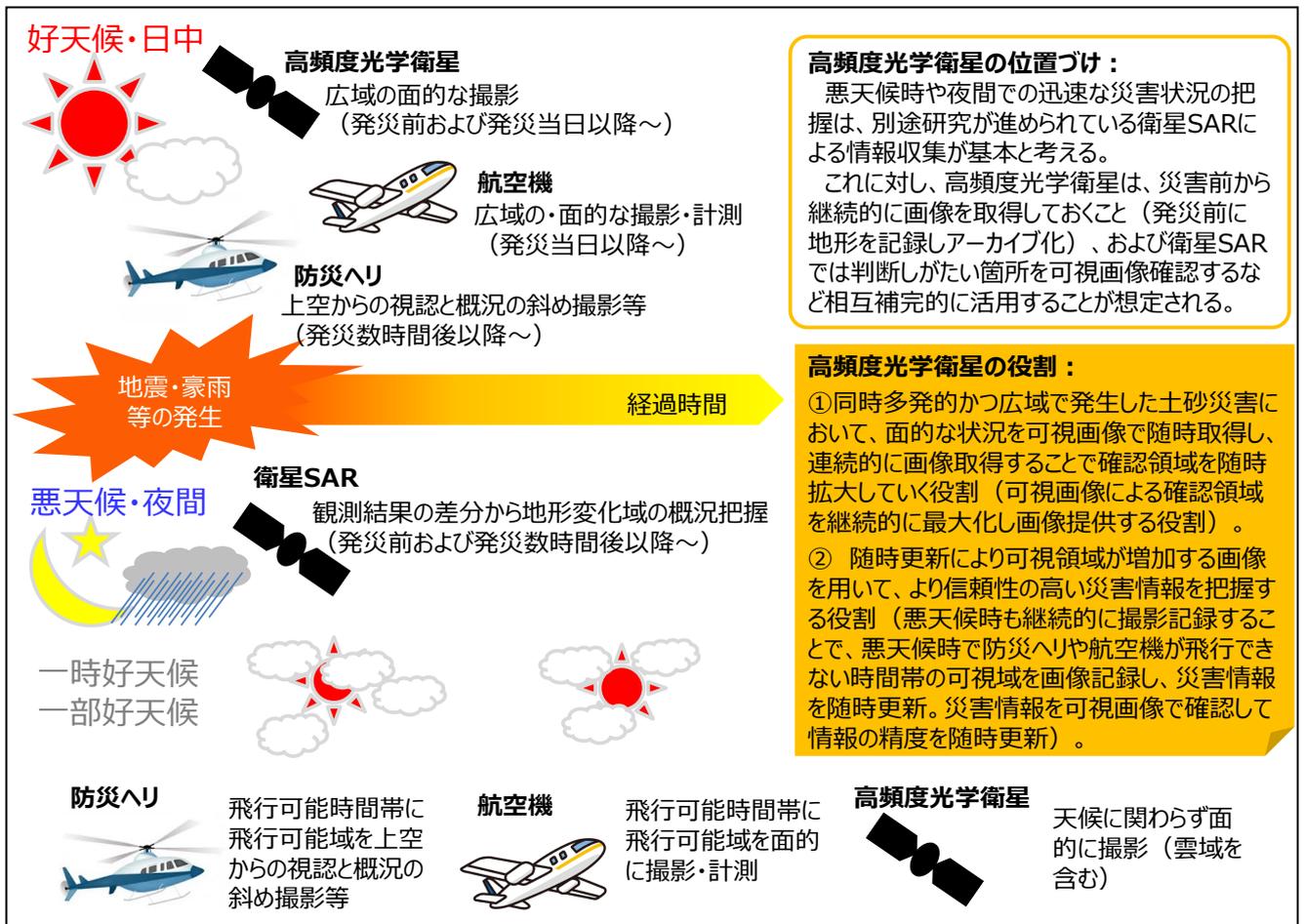


図 24 土砂移動域監視に必要な技術と高頻度光学衛星の位置づけと役割

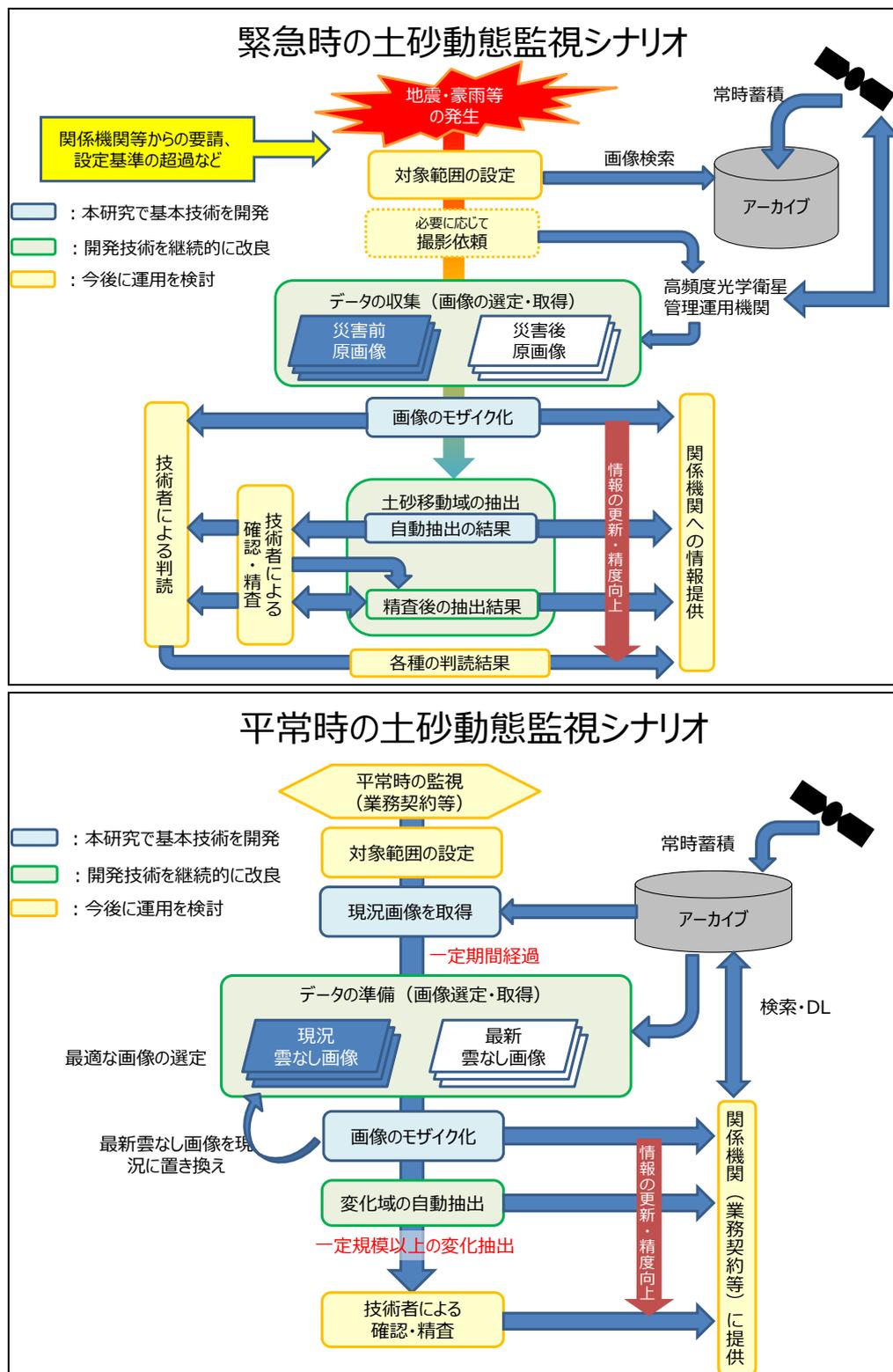


図 25 監視シナリオ（上：緊急時、下：通常時）

2) 高頻度衛星画像による土砂移動箇所のスクリーニング手法の開発

① 広域土砂動態監視の試験運用実証試験

(1) 教師データの再生成

平成 29 年度の土砂移動域抽出アルゴリズムの検討において、教師データとした土砂移動域が航空写真を判読したものであり、判読結果に堆積域(泥流移動域)を含まないため、衛星画像を用いた解析結果(差分解析・pix2pix とも)に影響した可能性があった。そこで、災害発生直後の雲が少ない 3 時期(8 月 20 日、22 日、27 日)の衛星画像を再判読し、教師データを再作成した。



図 26 衛星画像判読結果(左: 8 月 20 日、中央: 8 月 22 日、右: 8 月 27 日)

(2) 土砂移動域抽出の再解析

再作成した教師データを用いて、1) 災害前後の画像の比較による差分抽出と、2) 災害後の単独の画像を用いた深層学習による抽出の再解析を行った。

2 手法を比較した結果、深層学習は、伐採跡や人工改変地などの土砂移動域と類似した箇所が誤抽出されやすく、差分抽出はその傾向が少ない(面積規模の大きな箇所を誤抽出する傾向は見られない)ことがわかった(図 27 上段)。一方、差分抽出は、河川や湖沼等の水色の変化や農地の変化の影響により誤抽出する傾向が見られた(図 27 下段)。

災害前 2017/6/15

災害後 2017/8/22

差分抽出と深層学習の結果の重ね合わせ

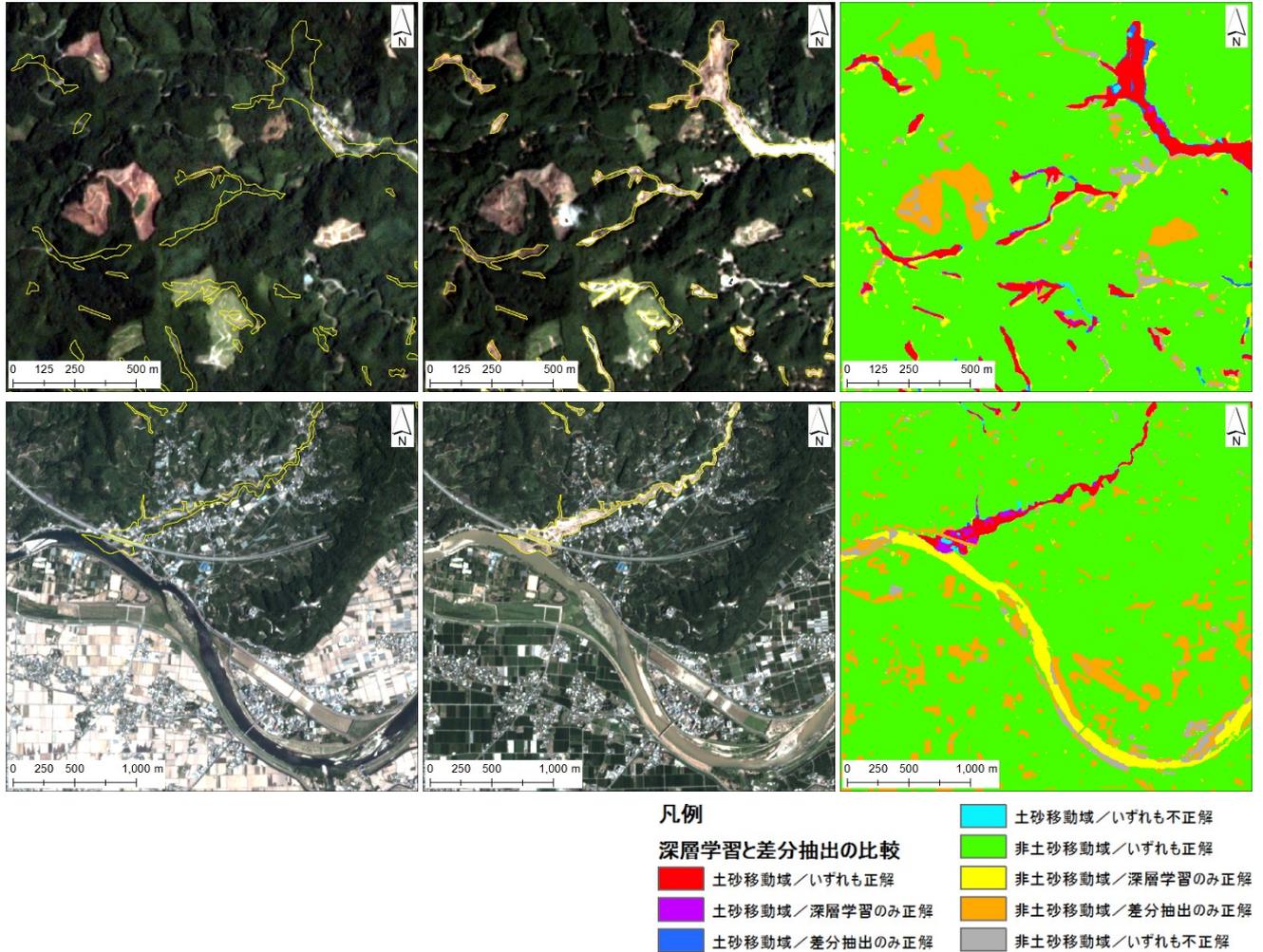


図 27 差分抽出と深層学習の抽出結果を比較した例

2手法の抽出結果を定量的に比較した結果、深層学習はプロデューサ精度 (PA) が高い (抽出漏れが少ない) が、ユーザ精度 (UA) は極めて低い (誤抽出が多い) 傾向を示した。一方、差分抽出は深層学習に比べ PA がやや低いものの、UA はやや高い傾向を示した。抽出漏れや誤抽出のパターンを詳細に把握するため、傾斜区別に精度や抽出面積を比較した結果、深層学習は斜度 10 度未満で誤抽出が特に多いことがわかった (判読結果の面積の約 6 倍に相当)。これに対して、差分抽出はいずれの傾斜区分においても判読結果の面積の約 2 倍程度に収まることがわかった。また、斜度が大きい領域では差分抽出の PA が深層学習と同様に高く、抽出漏れが少ないことがわかった。

判読結果に比べて2手法ともに誤抽出の面積が大きいため、2手法の論理積 (AND 演算) をとることにより、抽出精度が向上するか検討した。その結果、AND 演算は2手法に比べ PA が若干低下するものの、UA は斜面で 0.5 を越え最大となった。抽出面積についても、判読結果に最も近い値が得られた、

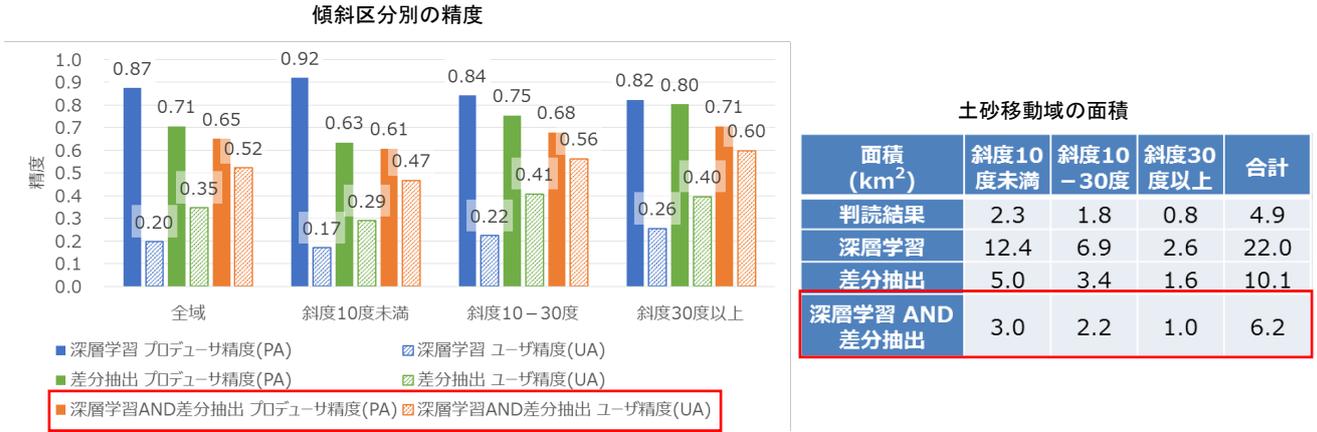


図 28 差分抽出と深層学習の抽出結果を定量的に比較した結果

(3) 災害時を想定した土砂移動領域抽出実験

九州北部豪雨のサンプル地区について、2017年6月～8月の蓄積された画像から比較対象として最も適切な画像を選定し、1)災害前後の画像の比較による差分抽出と 2)災害後の単独の画像を用いた深層学習による抽出の2手法により、土砂移動域の抽出が可能か実験を行った。

画像選定と差分抽出の実験は、監視シナリオに基づき5kmメッシュ単位で行うこととし、選定条件は、災害発生日(2017/7/5)よりX日前、あるいは、Y日後までの雲以外の領域が最大の2時期の画像であり、災害発生日に最も近い画像とした。このとき、雲域の判定は平成29年度に検討した雲域の自動抽出手法を用いて行った。

実験の結果、輝度値が飽和している画像や、太陽高度が低く地形陰影効果が大きい画像(太陽非同期軌道の衛星画像)など、比較対象として必ずしも望ましくない画像を選定されるケースが見られた。また、各メッシュの観測日や衛星が不揃いな結果が得られた。そこで、衛星画像のメタデータを参照して、雲量と太陽高度の条件により輝度値が飽和した画像や地形陰影効果が大きい画像を除外するとともに、雲以外の領域が同程度の画像が複数ある場合は同一観測日、同一衛星の画像で統一されるように選定方法を改善した。また、災害前後及び、各メッシュ間の画像の色調が全て統一されるよう、基準画像(災害前の雲なし画像)に合わせて撮影シーン毎に色調補正を行うこととした。

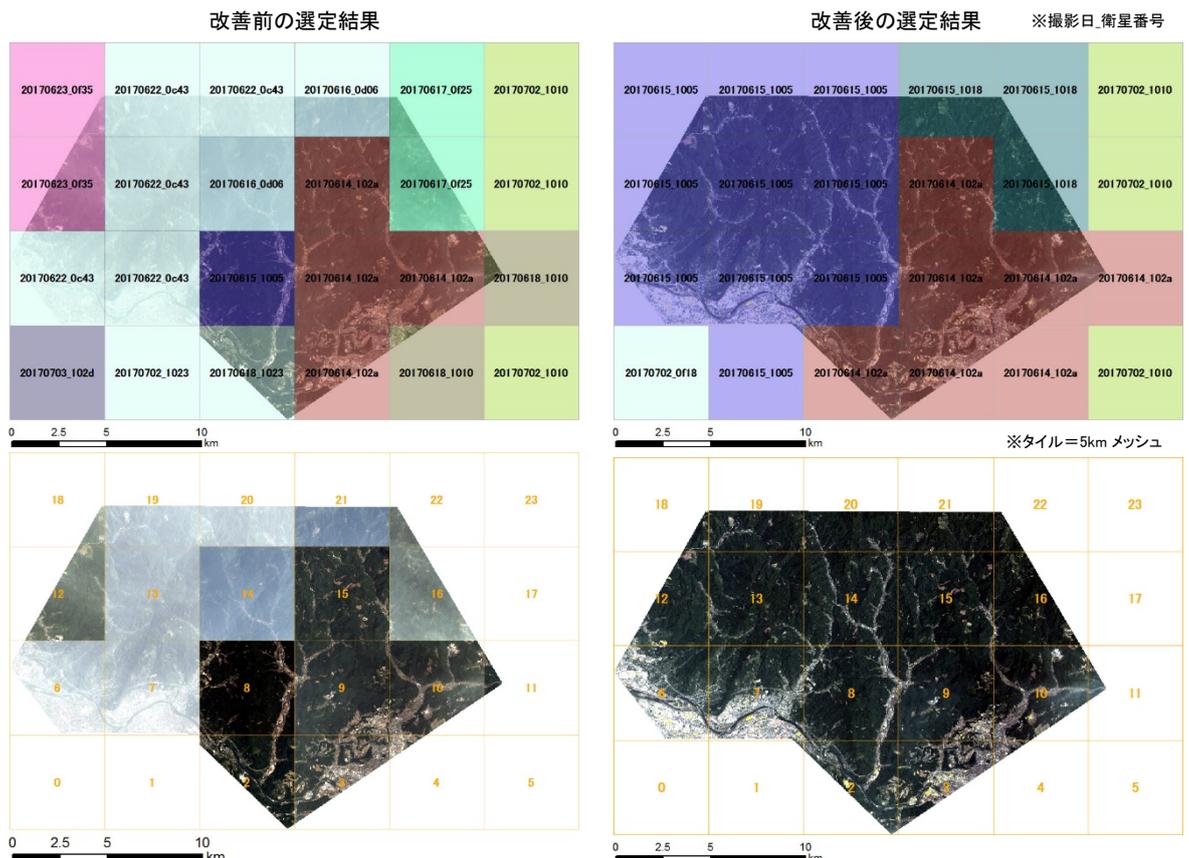


図 29 画像選定方法の改善
(災害発生日から30日前までの期間で選定された画像のモザイク)

改善後の方法で選定された2時期の画像を用いて、差分抽出実験を行った。実験の結果、色調が統一された災害前後それぞれのモザイク画像が得られるとともに、判読結果と同様の分布傾向を示す抽出結果が得られた。(深層学習による抽出実験については次項に示す)

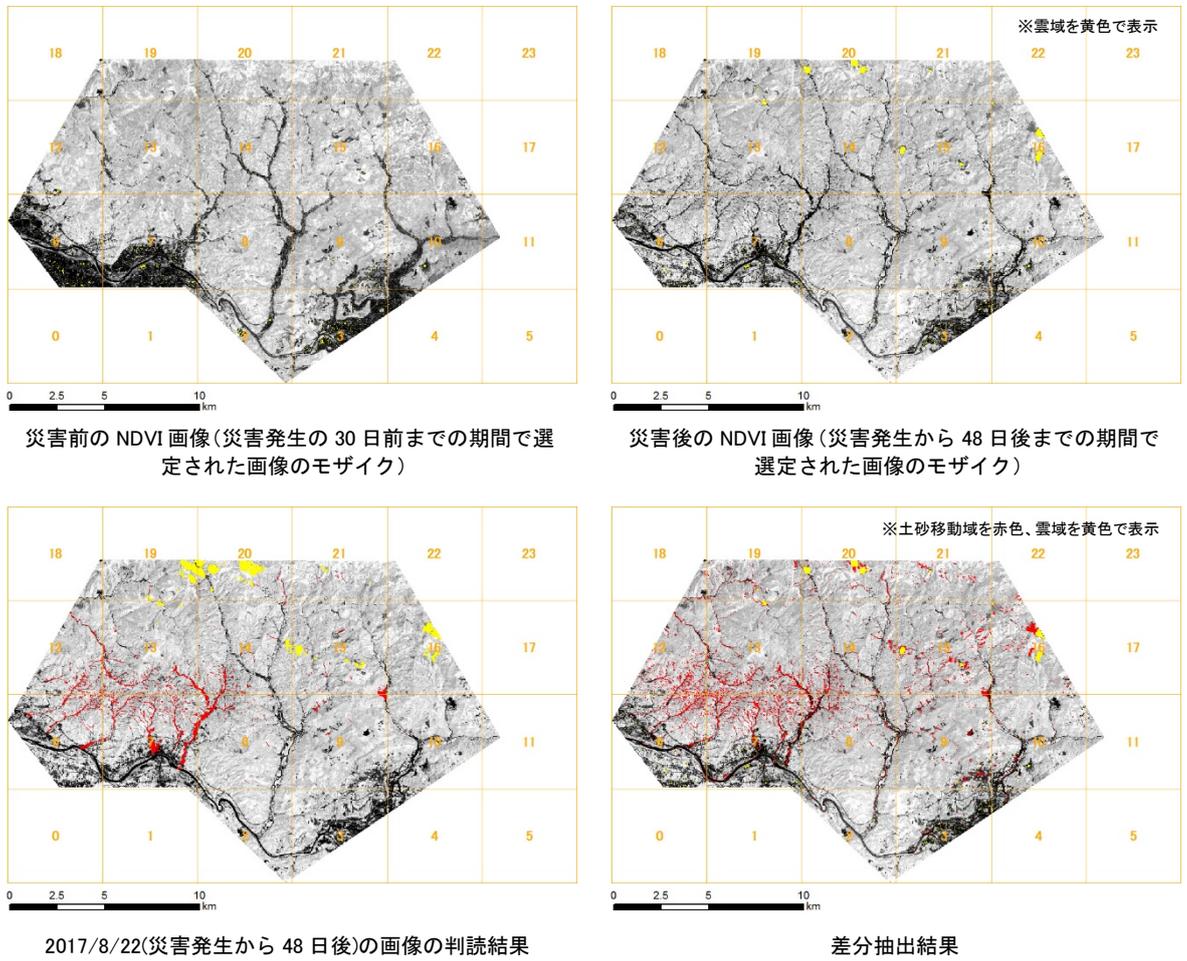
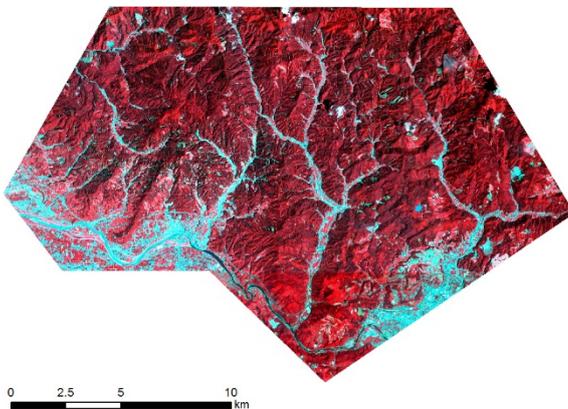


図 30 色調が統一された災害前後それぞれのモザイク画像と差分抽出結果

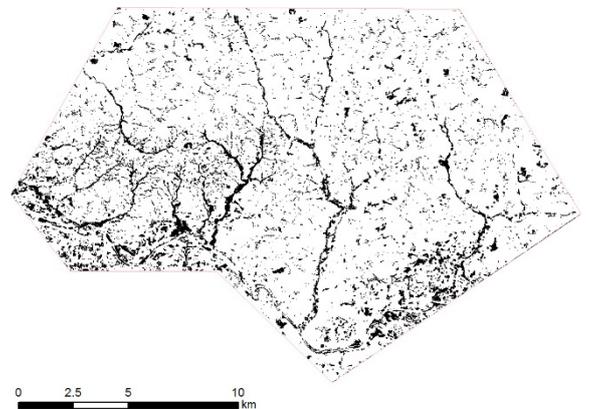
②機械学習による土砂移動領域の抽出アルゴリズムの検証と改良

上記①項の結果を受け、1)災害前後の画像の比較による差分抽出と 2)深層学習による抽出を組み合わせることにより、抽出アルゴリズムの改良を行った。上記②(2)項では、判読結果に比べて2手法ともに誤抽出の面積が大きいことが課題となったため、2手法の組合せのほか、斜度や土地被覆による抽出結果のスクリーニングを検討した。

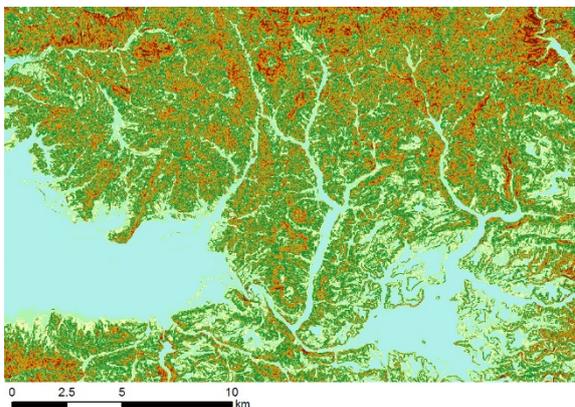
具体的には、上記①(3)項で得られた差分抽出結果(図30右下)と、災害後のモザイク画像(図31左上)に深層学習のpix2pixを適用して得られた抽出結果(図31右上)、国土地理院刊行の10mメッシュの数値標高モデル(DEM)から作成した斜度図(図31左下)、災害前の雲なしモザイク画像(2017/6/15)から画像分類により作成した土地被覆分類図(図31右下)を用いて、図32に示す組合せ方法によりスクリーニングを行った。



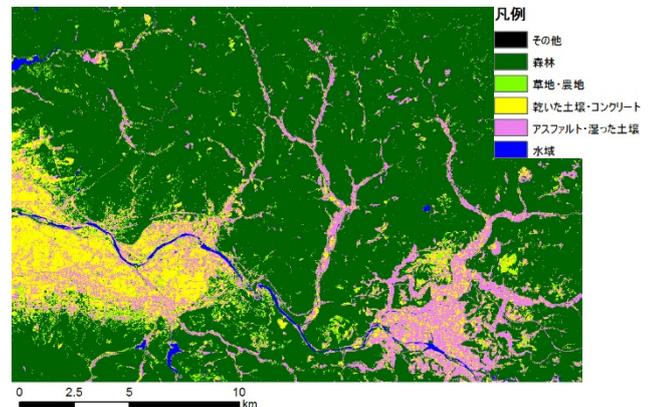
災害後のモザイク画像(災害発生から48日後までの期間で選定された画像のモザイク、深層学習の入力画像)



深層学習 (pix2pix) による抽出結果



10mメッシュDEMから作成した斜度図



災害前雲なしモザイク画像(2017/6/15)から作成した土地被覆分類図

図31 抽出アルゴリズムの改良に使用したデータ

組合せ A は 2 手法の抽出結果を論理積により組み合わせる方法であり、組合せ B は局所領域内における差分抽出結果が一定画素以上となった場合に深層学習の結果をそのまま採用する段階的な組合せ方法である。さらに、組合せ B に局所領域内の平均斜度が一定以上という条件を付加したものを組合せ C、局所領域内の森林・草地・土壌のいずれかの面積が一定以上という条件を付加したものを組合せ D、これら全ての条件を付加したものを組合せ E とした。

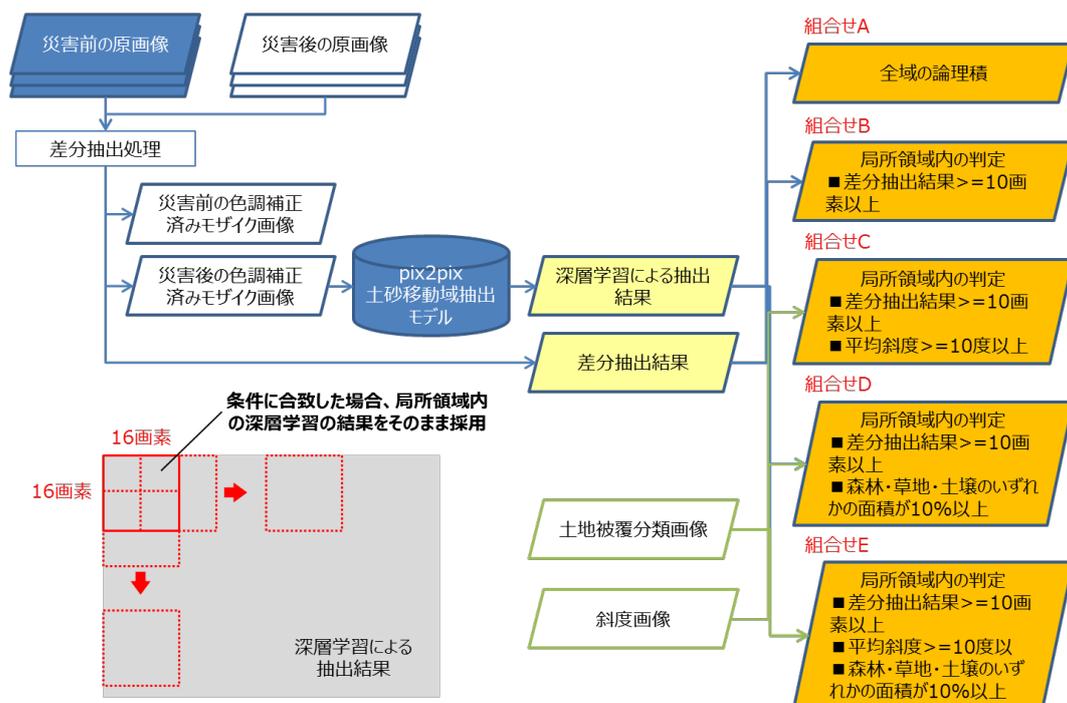


図 32 差分抽出と深層学習の組合せとスクリーニング方法

組合せ A～E による抽出結果を差分抽出および深層学習をそれぞれ単独で実施した場合と比較すると、組合せ A は差分抽出および深層学習よりも PA が低下するものの UA が向上しており、誤抽出を減少させる効果があったと言える。組合せ B～E はいずれも差分抽出の UA とほぼ同等であるが、斜度の条件がない組合せ B と D については PA が深層学習と同程度の高い値となり、斜度の条件がある組合せ C と E については PA が差分抽出の結果よりも下回った。また、組合せ B、D は PA、UA とともにほぼ同等であることから、今回の条件で斜度や土地被覆情報を利用することの改善効果はなかったと言える。土地利用の変化や土砂移動に関連しない農地の変化を除外するためには、今後検討が必要である。

以上の考察より、差分抽出と深層学習を論理積による組合せ（組合せ A）か段階的に組合せて用いた場合（組合せ B）、誤抽出または抽出漏れを改善する効果があると言える。

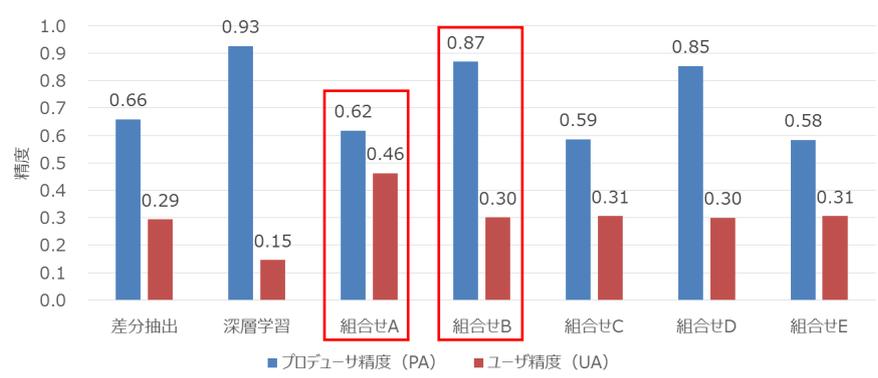
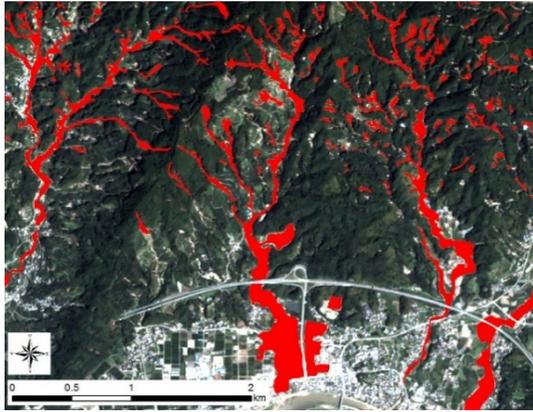
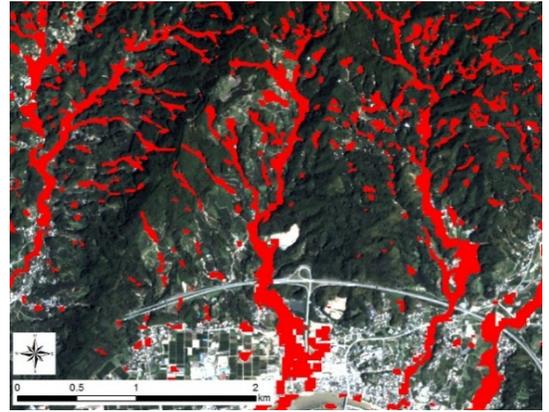


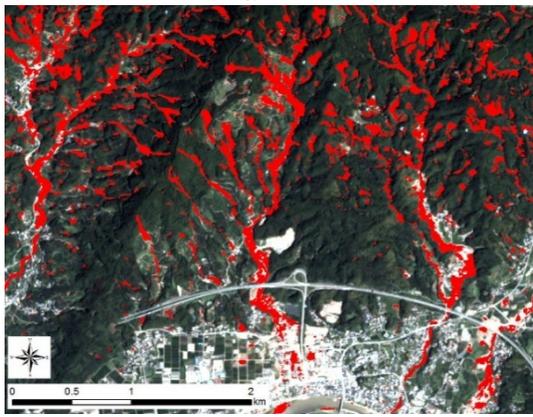
図 33 差分抽出と深層学習の組合せによる抽出結果の精度の比較



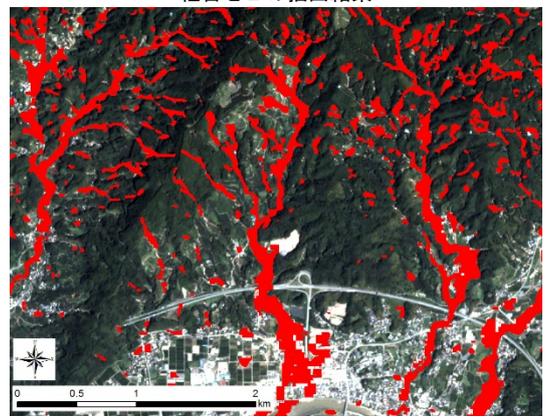
正解データ



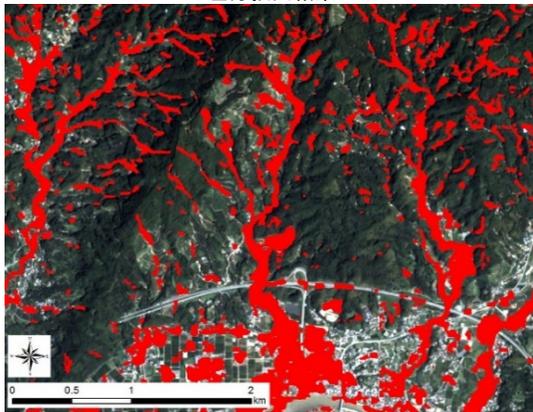
組合せBの抽出結果



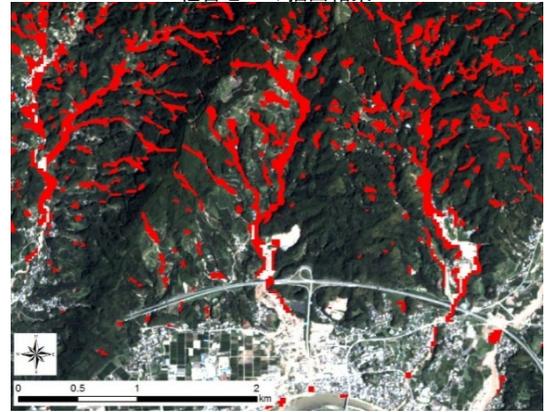
差分抽出結果



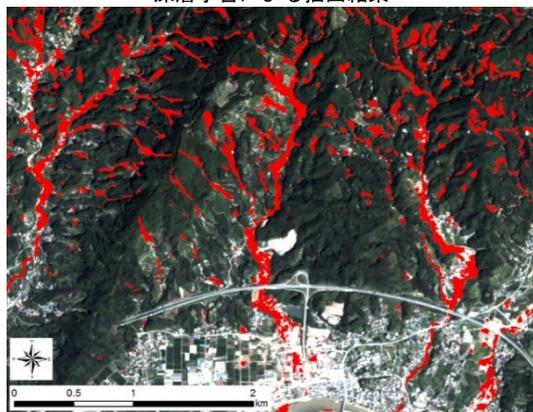
組合せDの抽出結果



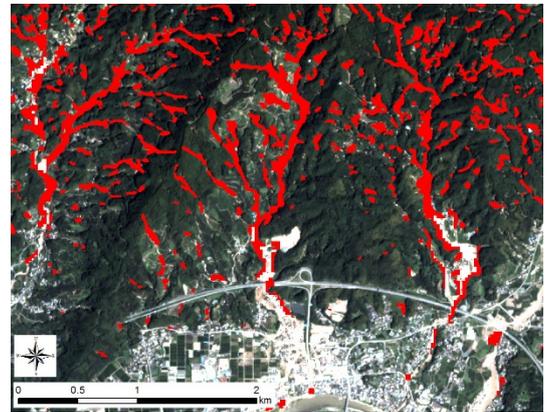
深層学習による抽出結果



組合せCの抽出結果



組合せAの抽出結果



組合せEの抽出結果

図 34 差分抽出と深層学習の組合せによる抽出結果の比較

(3) 成果の刊行に関する一覧表

刊行書籍 又は 雑誌名 (巻号数、論文名)	刊行年月日	刊行・発行元	原著者
平成 30 年度砂防学会研究発表会概要集、No. 83、高頻度衛星画像を用いた土砂移動箇所 の把握	H30. 05. 16	公益社団法人 砂防学会	船越ほか
令和元年度砂防学会研究発表会概要集、No. 84、高頻度光学衛星を用いた土砂移動域抽出手法の検討	R1. 05. 21	公益社団法人 砂防学会	船越ほか
日本リモートセンシング学会 第 66 回 (令和元年度春季) 学術講演会論文集、変化抽出と深層学習を組み合わせた土砂移動域の抽出技術の開発	R1. 06. 04	一般社団法人 日本リモートセンシング学会	角田ほか

(4) 成果による知的財産権の出願・取得状況

知的財産権の内容	知的財産権の種類・番号	出願年月日	取得年月日	権利者
現状なし				

(5) 成果の実用化^{*}の見通し ※論文発表や現場試行ではなく実業務での社会実装

同時多発的土砂災害の概況を迅速に把握することは、国や自治体などの危機管理対応として活用されるものであり、今後の土砂災害発生状況に対応した試行と検証をふまえたうえで、段階的に利用されていく可能性が高く、実用化にあたっては引き続きの検討を進めていく必要がある。このため、当面は豪雨や地震直後の緊急時への光学衛星画像の関係機関提供とともに、土砂移動域の自動抽出結果を参考情報として関係機関に提供していくことを進めていく予定である（無償による試行運用を想定）。

実業務としては、災害発生前後の画像比較や機械学習を用いた土砂移動箇所の自動抽出手法を応用した土砂移動域抽出の判読業務などに、その技術の一部活用していく予定である。

この他、アクセルスペース社 GRUS 衛星等でデータの蓄積及び開発手法の改良を進め、衛星コンステレーション体制（20 機運用）が始まる 2022 年以降に本格運用を目指す。

(12) その他

本研究で開発した、「光学画像からの雲域を自動除去技術」、「判読性が高い可視域最大画像の自動抽出・統合する技術」、「高頻度観測画像から災害前後比較と機械学習を用いて土砂移動域の疑いが高い箇所を自動抽出する技術」は、引き続き、異なる時期の土砂災害への適用性を検証していくとともに、令和元年度より土砂災害発生概況を行政関係機関などに迅速に参考情報として提供を進めていく予定である。