

災害発生後の光学センサ画像および SAR 画像  
を用いた土砂災害検出手法の開発

Development for Detecting the Landslide Areas  
Using Single Optical Sensor Image and  
Synthetic Aperture Radar Image

2019 年 7 月

理工学研究科 環境共生系専攻

江口 毅





# 災害発生後の光学センサ画像および SAR 画像を用いた土砂災害検出手法の開発

## 要 旨

衛星画像は広域を一度に観測することが可能なことから、被害が広域におよぶ場合や同時多発的な災害が発生した場合において、短時間で広域の被害状況を把握できる有効な手段である。このような背景から国内外において衛星画像を用いた被害状況把握に関する研究が多く行われてきた。

既往の研究では災害発生前後の 2 時期の画像の差分や相関をとることで災害による変化箇所を検出する手法が多く用いられている。このような手法では災害発生前後 2 時期の画像が入手できることが前提となる。

しかし、地域によってはアーカイブ画像が少なく、災害発生前の古い画像しかない場合や雲が映り込んでいることにより解析に利用できない画像しかない場合がある。また、2 時期の画像が入手できた場合でも、季節の違いによる影響の除去や画像の位置合わせ等の補正処理をデータセット毎に行う必要があり、大量の画像処理を必要とする大規模災害発生時には時間と労力が必要となる。

本研究では、災害発生前のアーカイブ画像が入手できない場合やデータセット毎の補正処理を必要としない解析手法の開発を目的とし、災害発生後のみの衛星画像（光学センサおよび Synthetic Aperture Radar: SAR）から災害発生域、ここでは土砂災害発生域を検出する手法の開発を行った。また、本研究で開発した 5 種類の検出手法における、検出精度、災害への適用度、データの入手についての特徴を整理し、各検出手法の有効性について検証した。

光学センサ画像を用いた検出手法の開発では、2008 年岩手・宮城内陸地震と 2009 年中国・九州北部豪雨において発生した土砂災害を対象とし、土砂災害の検出に一般的に用いられる正規化植生指数（Normalized Difference Vegetation Index : NDVI）と本研究で新たに考案する NIR, Blue, Red の 3 つの Band を組み合わせた NBR を指標とした 2 種類の検出手法の開発を行った。

その結果、NDVI 画像と NBR 画像における土砂移動域・植生域・水域のヒストグラムの交点を閾値とすることで、災害発生後のみの衛星画像からでも土砂災害の原因となる土砂移動箇所を検出できることを示すことができた。

具体的には、NDVI 画像を用いた検出では、2008 年岩手・宮城内陸地震では閾値を 0.15～0.62、2009 年中国・九州北部豪雨では閾値を 0.15～0.50 とすることで、500m<sup>2</sup>以上の規模の土砂移動箇所を、2008 年岩手・宮城内陸地震では検出率 99%正答率 29%、2009 年中国・九州北部豪雨では検出率 93%正答率 4%の検出精度で検出でき、土砂移動箇所を見落としが少なく検出できることを示すことができた。

NBR 画像を用いた検出では、2008 年岩手・宮城内陸地震では閾値を -0.23～0.13、2009

年中国・九州北部豪雨では閾値を $-0.21\sim 0.02$  とすることで、 $500\text{m}^2$ 以上の規模の土砂移動箇所を、2008年岩手・宮城内陸地震では検出率80%正答率52%、2009年中国・九州北部豪雨では検出率73%正答率3%の検出精度で検出でき、NDVI画像を用いた場合と比べて誤検出が少なく検出できることを示すことができた。

SAR画像を用いた検出手法の開発では、平成26年8月豪雨において発生した土砂災害を対象として、土砂災害の検出に一般的に用いられる単偏波(HH, HV, VH, VV)画像と本研究で新たに考案する2偏波演算画像および4偏波演算画像を用いた場合の3種類の検出手法を開発を行った。

その結果、3種類全ての検出手法において、衛星から観て $\pm 90$ 度未満の手前側の土砂移動箇所を概ね検出できた。

単偏波画像ではHH偏波画像を用いた検出が最も土砂移動箇所を検出することができた。閾値を $-6.2\sim 13.4$  と設定することで山の両側の土砂移動箇所を19箇所中18箇所検出することができ、土砂移動箇所を見落としが少なく検出できることを示すことができた。

2偏波演算画像を用いた検出では $-20.70\sim -2.20$  と  $0.96\sim 9.71$  の範囲の値、4偏波演算画像では $-37.30\sim -0.64$  と  $0.98\sim 16.09$  の値を土砂移動箇所として検出することで、衛星から観て山の手前側に位置する土砂移動箇所を11箇所中11箇所全て検出でき、単偏波画像を用いた場合と比べて誤検出が少なく検出できることを示すことができた。

本研究における成果は、災害発生前のアーカイブ画像が入手できない場合の土砂災害検出に有効であり、今後打ち上げが予定されているALOS-3やALOS-4が打ち上げられた際、アーカイブ画像が整備されるまでの間に発生した土砂災害の検出に貢献できる。また、データセット毎の前処理が不要であるため、機械学習のトレーニングデータを作成することが可能であり、土砂災害の自動検出にも貢献できる。

# Development for Detecting the Landslide Areas Using Single Optical Sensor Image and Synthetic Aperture Radar Image

## Abstract

Satellite remote sensing is one of the useful tools to understand the situation of damaged areas when a severe natural disaster occurred because that can observe remotely wide area at a once.

In general, it is necessary to use satellite image both before and after to extract damaged areas due to natural disaster. It is very easy to detect changes of land surface by comparing before and after images.

However, it is not always a possible method in emergency situation. There is no useful archive data in some region for detecting damages. Furthermore, additional pre-processing is required such as geometric correction and removing effects of seasonal changes for each data sets.

In this study, I would like to propose the new method to detect landslide areas just using satellite images of after natural disaster occurrence. ALOS and ALOS-2 as optical sensor and Synthetic Aperture Radar (SAR) images are applied for this study and the characteristics of each methods are evaluated in actual disaster events.

I developed two methods to detect landslide areas using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and NIR-Blue-Red (NBR). I developed NBR as new index for the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake and the 2009 July Chugoku-Northern Kyushu Heavy Rainfall for application of optical sensor images.

As a result, I found that it is possible to detect landslide areas from two thresholds which are determined as intersections of histograms created from the pixel values of landslide area, vegetation area and water area in NDVI and NBR images.

The method using NDVI could detect landslide areas with 99% recall and 29% precision for the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake when the region of 0.15-0.62 which was determined by the two thresholds, and with 93% recall and 4% precision for the 2009 July Chugoku-Northern Kyushu Heavy Rainfall when 0.15-0.50 was used. On the other hand, the method using NBR could detect those with 80% recall and 52% precision for the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake when  $-0.23-0.13$  was used, and with 73% recall and 3% precision for the 2009 July Chugoku-Northern Kyushu Heavy Rainfall when  $-0.21-0.02$  was used. From the results, we can that the method using NDVI is possible to detect with high recall and the method using NBR is possible to detect with high precision.

For SAR applications, I developed three methods; first, using one polarization images such as HH, HV, VH and VV images, second, using two polarization images of four images, and third using all the four polarization images for the 2014 August Heavy Rainfall.

The method using HH polarization image could detect 18 landslide areas of 19 landslide areas which actually occurred for the 2014 August Heavy Rainfall when  $-6.2-13.4$  was used as thresholds. The method using two-polarization images and four-polarization images could detect all landslide areas in front side slope.

As a conclusion, landslide areas can be detected using the proposed methods which use only “after image”. This is very useful in emergency disaster phase in case that “before image” cannot be obtained. Furthermore, this study can contribute for coming new satellite data such as ALOS-3 and ALOS-4, also for making training data for machine learning without pre-processing for each data sets.

## 目次

<b>1</b>	<b>序論</b> .....	1
1.1	日本における自然災害.....	1
1.1.1	地震.....	1
1.1.2	風水害.....	3
1.2	日本の災害対応の現状と課題.....	6
1.2.1	災害対応の現状.....	6
1.2.2	災害対応の課題.....	7
1.3	衛星リモートセンシング.....	7
1.3.1	リモートセンシングの概要.....	7
1.3.2	観測機器（センサ）の特徴.....	8
1.4	衛星画像を用いた土砂災害の検出に関する既往研究.....	9
1.4.1	光学センサ画像を用いた既往研究.....	9
1.4.2	合成開口レーダ（SAR）画像を用いた既往研究.....	10
1.4.3	既往研究における課題.....	11
1.5	研究目的.....	11
1.6	論文の構成と概要.....	12
	参考文献	
<b>2</b>	<b>災害発生後の NDVI 画像を用いた土砂災害検出手法</b> .....	17
2.1	緒言.....	17
2.2	解析対象.....	17
2.2.1	2008 年岩手・宮城内陸地震.....	17
2.2.2	2009 年中国・九州北部豪雨.....	18
2.3	使用データ.....	19
2.3.1	衛星データ.....	19
2.3.2	その他データ.....	21
2.4	解析手順.....	22
2.5	検出結果と考察.....	26
2.5.1	各地区を対象とした場合の検出結果と考察.....	26
2.5.2	広域を対象とした場合の検出結果と考察.....	32
2.6	NDVI 画像を用いた 2016 年熊本地震による土砂移動箇所の検出の試み.....	38
2.6.1	解析対象と使用データ.....	38

2.6.2	熊本県南阿蘇村立野地区を対象とした場合の検出結果と考察.....	39
2.7	結語.....	41
	参考文献	
<b>3</b>	<b>災害発生後の NBR 画像を用いた土砂災害検出手法.....</b>	<b>45</b>
3.1	緒言.....	45
3.2	解析対象と使用データ.....	45
3.3	新しい指標 NBR の検討.....	46
3.3.1	新しい指標に用いる Band の検討.....	46
3.3.2	新しい指標の提示.....	48
3.4	解析手順.....	49
3.5	検出結果と考察.....	51
3.5.1	各地区を対象とした場合の検出結果と考察.....	51
3.5.2	広域を対象とした場合の検出結果と考察.....	56
3.6	NBR 画像を用いた 2016 年熊本地震による土砂移動箇所の検出の試み.....	63
3.6.1	解析対象と使用データ.....	63
3.6.2	熊本県南阿蘇村立野地区を対象とした場合の検出結果と考察.....	63
3.7	結語.....	65
	参考文献	
<b>4</b>	<b>災害発生後の単偏波画像を用いた土砂災害検出手法.....</b>	<b>69</b>
4.1	緒言.....	69
4.2	解析対象.....	69
4.3	使用データ.....	71
4.3.1	衛星データ.....	71
4.3.2	その他データ.....	75
4.4	解析手順.....	75
4.5	SAR 画像上における土砂移動箇所の特定.....	77
4.5.1	フォアショートニングによる倒れ込み.....	77
4.5.2	フォアショートニングによる倒れ込みを考慮した SAR 画像上の土砂移動箇所の特定.....	79
4.6	検出結果と考察.....	80
4.6.1	八木・緑井地区を対象とした場合の検出結果と考察.....	81
4.6.2	可部東地区を対象とした場合の検出結果と考察.....	86

4.7	結語.....	89
	参考文献	
<b>5</b>	<b>災害発生後の複数偏波画像を用いた土砂災害検出手法.....</b>	<b>93</b>
5.1	緒言.....	93
5.2	解析対象と使用データ.....	93
5.3	2 偏波演算画像と 4 偏波演算画像の検討.....	94
5.3.1	2 偏波演算画像の検討.....	94
5.3.2	4 偏波演算画像の検討.....	95
5.4	解析手順.....	96
5.5	検出結果と考察.....	97
5.5.1	八木・緑井地区を対象とした場合の検出結果と考察.....	98
5.5.2	可部東地区を対象とした場合の検出結果と考察.....	102
5.6	結語.....	104
	参考文献	
<b>6</b>	<b>結論.....</b>	<b>107</b>
6.1	本研究のまとめ.....	107
6.1.1	各章のまとめ.....	107
6.1.2	各検出手法のまとめ.....	110
6.2	今後の課題と将来の展望.....	112

## 謝辞





# 1 序論

## 1.1 日本における自然災害

日本は地理的条件や気候的条件から地震や台風、土砂災害などの自然災害が発生しやすい。特に、地震やそれに伴う津波、台風や梅雨の長雨による風水害は昔から日本各地で発生している。

### 1.1.1 地震

日本は環太平洋造山帯に位置しており、火山噴火や地震による被害が多く発生している。図-1.1は、世界の主なプレートと地震の震央を示した地図である<sup>1)</sup>。赤丸は震央の位置を示しており、太平洋を囲む赤丸の帯が環太平洋造山帯である。図-1.1からわかるように、日本では多くの地震が発生している。これは、日本周辺に位置する4枚のプレートの影響によるものである。図-1.2は日本周辺のプレートを示した模式図である<sup>1)</sup>。日本周辺には、海洋プレートである太平洋プレートとフィリピン海プレート、大陸プレートである北米プレートとユーラシアプレートの4枚のプレートがあり、海洋プレートが年間数cmの速度で大陸プレートの下に沈み込んでいる。そのため、日本周辺の地下ではこのプレートの沈み込みによる歪みエネルギーが常に蓄積されており、そのエネルギーが解放されることで大きな地震が発生する。

このように日本は地震が発生しやすい条件下にあるため、昔から大きな地震が繰り返し発生している。

図-1.3は日本における主な地震（ただし、全ての地震を網羅しているわけではない）を時系列順に並べた年表である<sup>2)</sup>。円内の数値は地震のマグニチュードを示しており、円は推測される震源地域の位置を示している。図-1.3から、東北地方の三陸沖地域や四国地方の南海

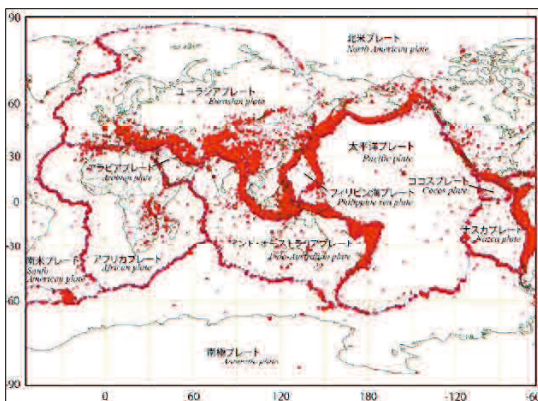


図-1.1 世界の主なプレートと地震の分布<sup>1)</sup>

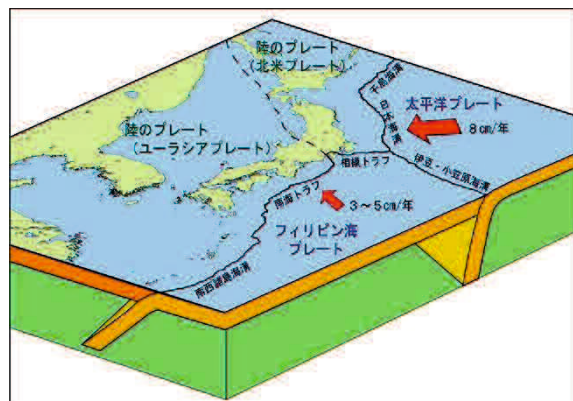


図-1.2 日本付近のプレートの模式図<sup>1)</sup>

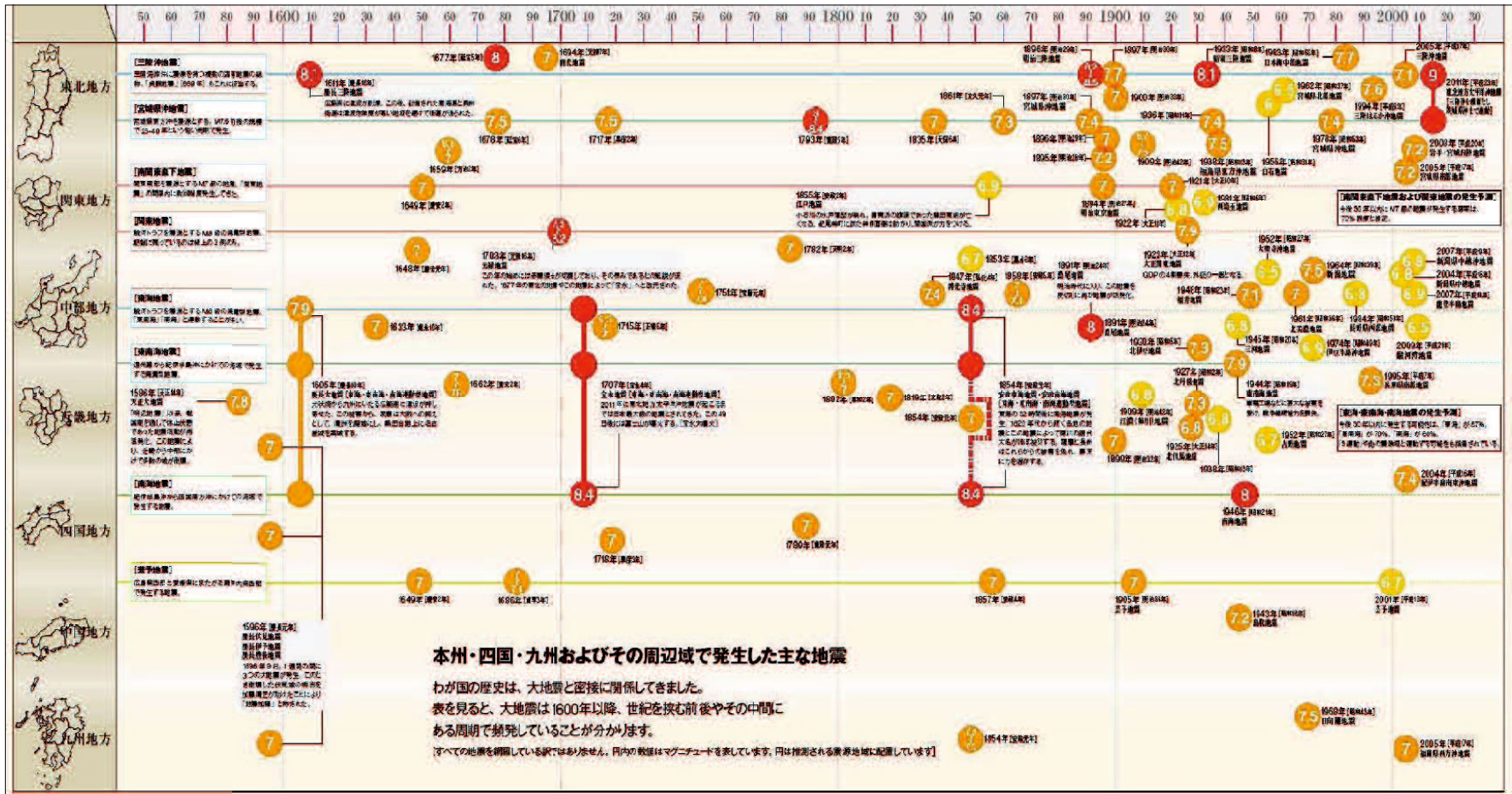


図-1.3 日本における過去の主な地震<sup>2)</sup>

地域では 100 年前後の間隔でマグニチュード 8 を超える大きな地震が繰り返し発生していることがわかる。また、東海、東南海、南海地域ではそれぞれの地域の地震が単体で発生することもあるが、これら 3 つの地域の地震が同時期に連鎖的に発生することもあることがわかる。

地震には地震が比較的少ない“静穏期”と地震が頻繁に発生する“活動期”とがあり、これらが交互におとずれる。“静穏期”はプレートの沈み込みによる歪みエネルギーなど地震の原因となるエネルギーが蓄積される時期であるため、地震が比較的少ない。しかし、“活動期”は蓄積されたエネルギーが解放される時期であるため、地震が多く発生する。

図-1.4 は日本気象協会が公開している過去の地震情報を基に作成した、阪神・淡路大震災以降西日本で発生した震度 5 弱以上の地震の分布図である<sup>3)</sup>。それぞれの円は赤色が直下地震を、紫色がプレート境界地震の震央を示している。また、円の大きさは地震の規模（マグニチュード）を示している。この図が示すように、阪神淡路大震災以降、西日本の各地ではマグニチュード 5 を超える大きな地震が多く発生しており、西日本は地震の“活動期”に入っていると言われている。また、地震の発生位置に着目すると青色の枠で示した南海トラフ地震で予想される震源域を取り囲むように大きな地震が発生しており、南海トラフ地震の発生が着々と近づいていることが予測される。

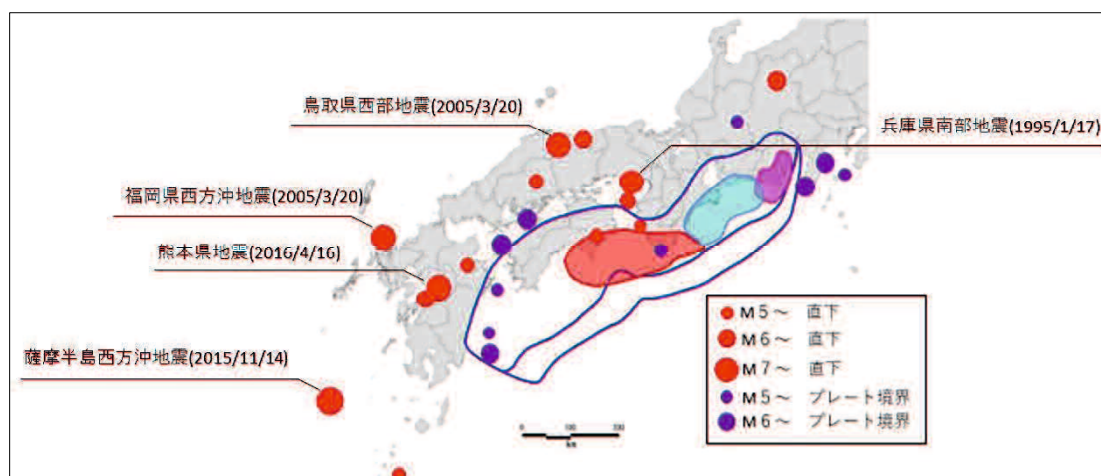


図-1.4 阪神淡路大震災以降において西日本で発生した主な地震

### 1.1.2 風水害

日本では毎年 5 月から 7 月にかけて梅雨の時期をむかえ、前線の停滞により日本各地で雨が降り続く。図-1.5 は鹿児島気象台が公開している九州南部・奄美地方の梅雨前後の降水量（1981～2010 年の 30 年平均値）を示したグラフである<sup>4)</sup>。図-1.5 からわかるように、降水量がピークとなる 6 月には、梅雨の前後の月と比べ約 2 倍もの雨が降る。そのため、日本各地では洪水などの被害がこの時期に集中的に発生する。

また、7 月から 8 月にかけては台風上陸の時期をむかえ、台風による風水害の被害が発生



する。図-1.6 は国土交通省気象庁が公開している台風の上陸数を基に作成した、1978 年から 2017 年の年別の台風上陸数を示したグラフである<sup>5)</sup>。この図からわかるように、過去 40 年間の台風の上陸回数はおおよそ一定回数であり、増減傾向は確認できない。しかし、日本では年平均 3 回程度台風が上陸しており、多い年には 10 回も台風が上陸することがわかる。

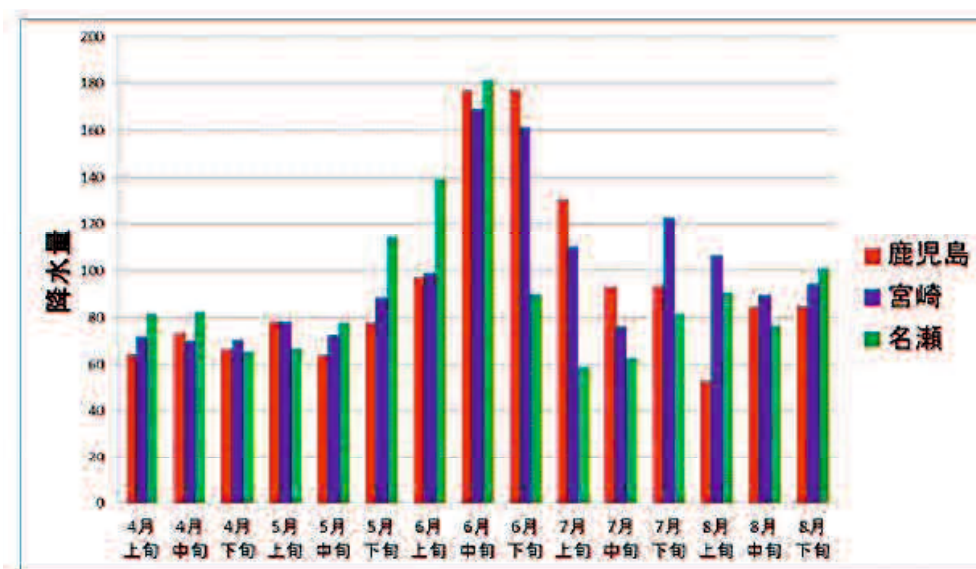


図-1.5 梅雨前後の旬毎の降水量（1981～2010 年の 30 年平均値）<sup>4)</sup>

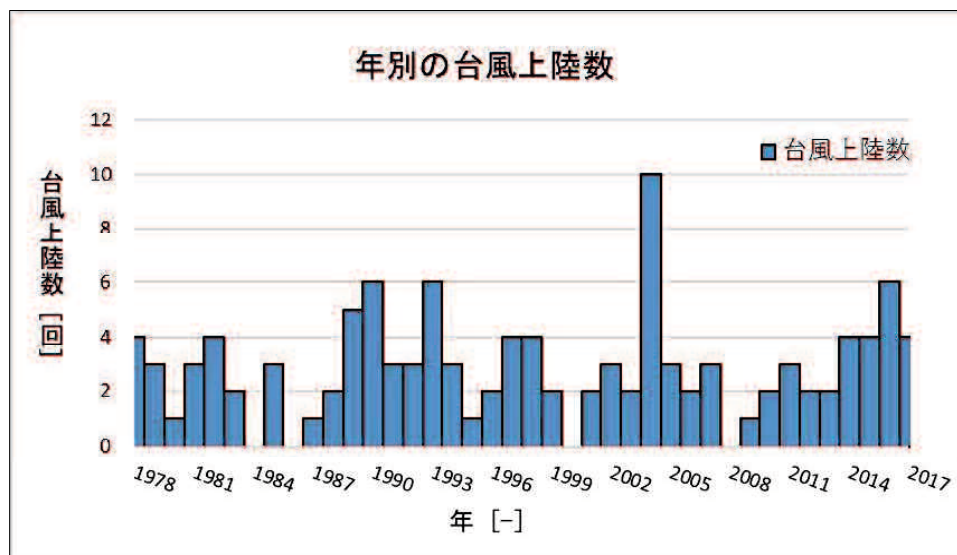


図-1.6 日本における過去 40 年間の台風上陸回数

図-1.7 と図-1.8 はそれぞれ、気象庁が公開している 1976～2017 年における 1 時間降水量 50mm 以上と 1 時間降水量 80mm 以上、いわゆる集中豪雨の年間発生回数のグラフである<sup>6)</sup>。図中の赤線は 10 年間毎の年間発生回数の傾向を示しており、それぞれの図から集中豪雨の発生回数は増加傾向にあることがわかる。

また、国土交通省砂防部が毎年発表している土砂災害発生件数をグラフにしたものを図-1.9 に示す<sup>7)</sup>。グラフは 2005 年から 2017 年における土砂災害発生件数を、がけ崩れ、地滑り、土石流等の種類別に示しており、赤線は表示期間（12 年間）における発生件数の傾向を示している。この図には地震などを起因とする土砂災害も入っており、必ずしも集中豪雨の発生回数の増加が砂災害の発生件数の増加によるものとは限らないが、土砂災害についても近年、発生件数が増加傾向にあることがわかる。

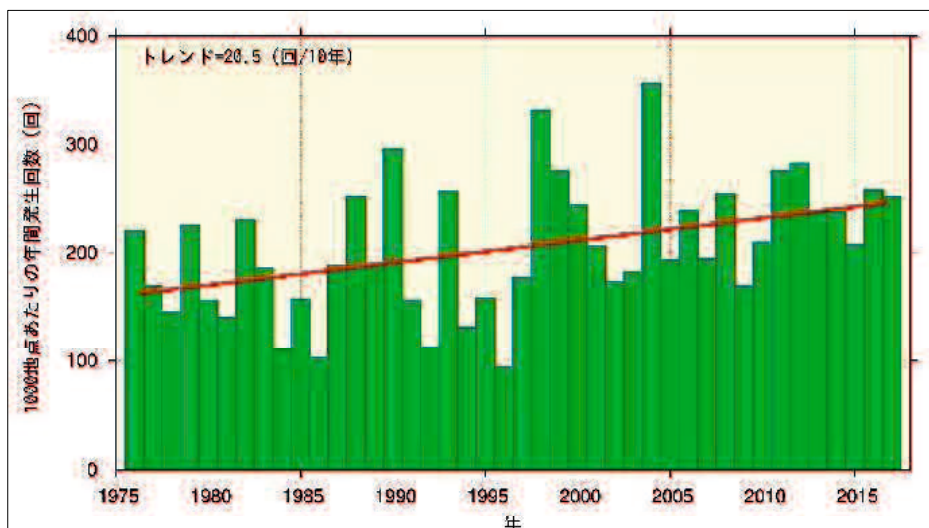


図-1.7 1976～2017 年における[アメダス]1 時間降水量 50mm 以上の年間発生回数<sup>6)</sup>

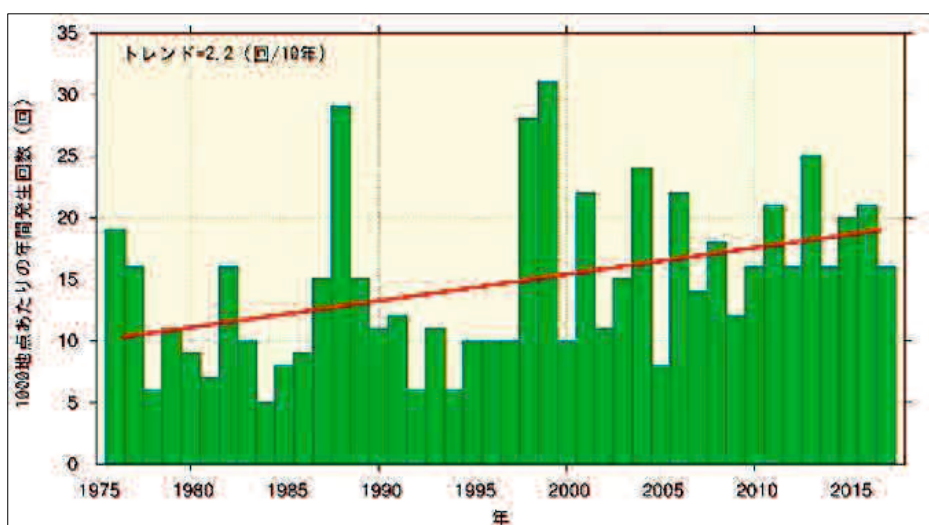


図-1.8 1976～2017 年における[アメダス]1 時間降水量 80mm 以上の年間発生回数<sup>6)</sup>

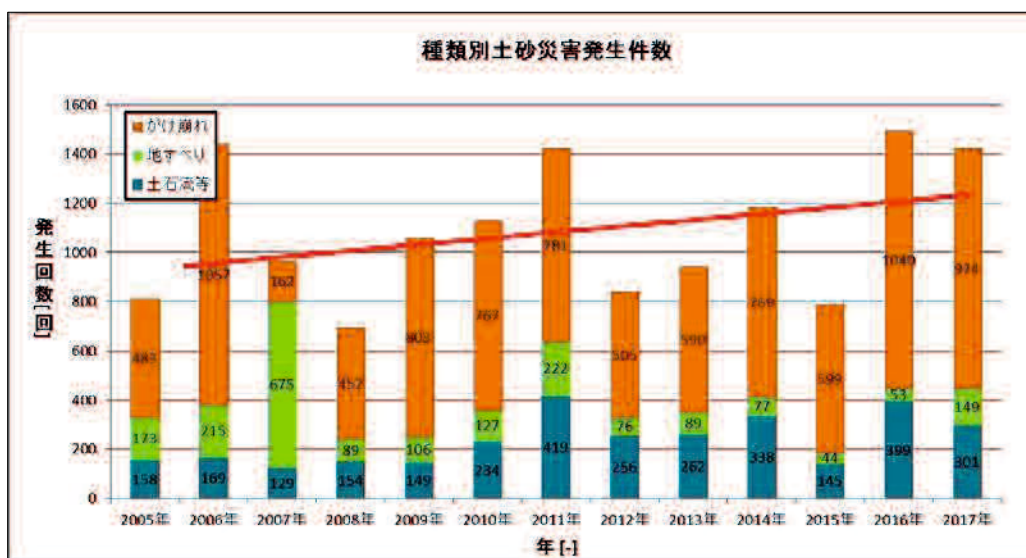


図-1.9 2005～2017年における土砂災害発生件数

## 1.2 日本の災害対応の現状と課題

### 1.2.1 災害対応の現状

地震や洪水など自然災害の種類によって災害発生後の対応は多少異なるが、一般的に被災地の自治体では、災害対策本部の設置や消防・警察・自衛隊への出動要請、救助活動など様々な活動が行われる。

東日本大震災を例に災害発生後の被災地の動きを図-1.10に示す。図-1.10は3月11日から3月17日までの消防本部通信指令課の災害活動経過概要を基に作成した、災害発生後の被災地自治体における動きを時系列順に示したものである<sup>8)</sup>。青色の項目は外部からの救援

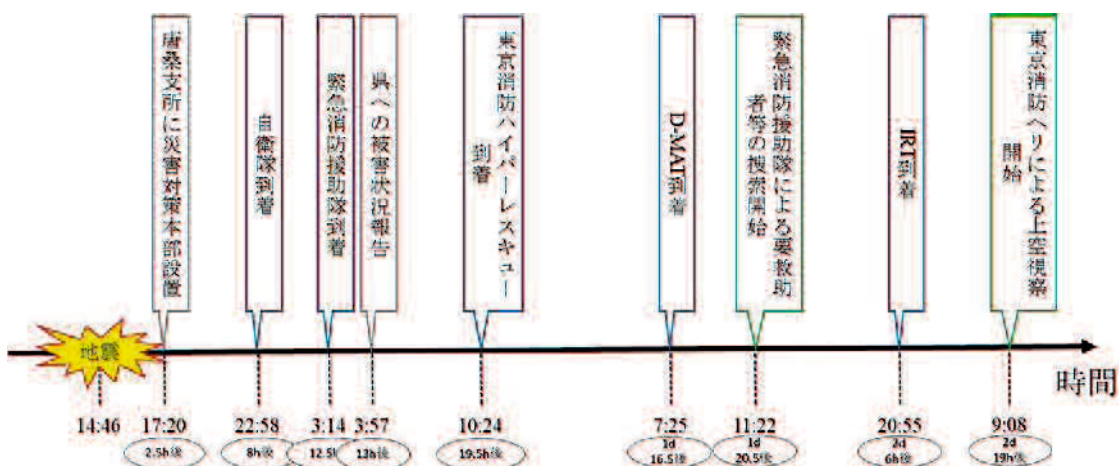


図-1.10 東日本大震災における被災地での災害対応

隊などの受け入れに関するもの、緑色は救援隊などによる活動、灰色はその他の災害対応を示す。なお、図に記載した項目は災害発生後の流れをわかりやすくするために代表的な項目を一部抜粋したものである。

図-1.10 が示すように、災害発生後、被災地では外部から自衛隊や消防隊など救援隊が次々と現場に参集する。そして、集まった救援隊は被災地各地へと派遣され救助や救援活動に当たる。そのため、これらの活動を迅速かつ適切に行うためには、被害状況の全体像を迅速に把握することが重要である。

## 1.2.2 災害対応の課題

日本は海外の国と比べ国土が狭く情報インフラが整備されているため、比較的小規模な災害であれば、住民からの通報や消防・警察からの連絡、現地調査などによる情報収集により、被害状況を把握することが可能である。また、航空機やヘリコプターなどによる上空からの情報収集方法も充実している。

住民からの通報や消防・警察からの連絡はいち被害状況を把握することができ、現地調査は被害状況をある程度面的かつ詳細に把握することができる。一方、航空機やヘリコプターによる上空からの観測は現地調査と比べて広い範囲の被害状況を短時間で把握することが可能である。

しかしながら、被害が極めて広域に及ぶ場合や同時期に複数箇所で被害が発生する大規模災害発生時においては、人員や調査機材が圧倒的に不足することにより通報や現地調査による被害状況の全体像把握は不可能である。一方、航空機やヘリコプターによる上空からの調査は被害範囲が広域な場合、広域を適切に飛行するための計画を立てる必要があるが、その飛行計画を立てるためには被災地域全域の大まかな被害状況を把握しておく必要がある。また、雨天時や夜間においては上空からの調査は行えないといった課題もある。

## 1.3 衛星リモートセンシング

### 1.3.1 リモートセンシングの概要

前述した課題を解決する手段として、近年、広域を一度に観測することができる衛星リモートセンシングが災害発生時に活用されており、特に被害が広域におよぶ大規模災害発生時の被害状況把握に有効と考えられている<sup>9)~14)</sup>。

リモートセンシングとは、光や電磁波を用いて離れた対象物を触れることなく観測する技術の総称であり<sup>15)</sup>、図-1.11 はリモートセンシングの種類と特徴を示したものである。

一般的に、低高度から観測する航空機やヘリコプターは高解像度の情報が得られる反面、一度に観測できる範囲は狭い。一方、高高度から観測する衛星は、航空機などと比べると情報の分解能は劣るが一度に広範囲を観測することができる。



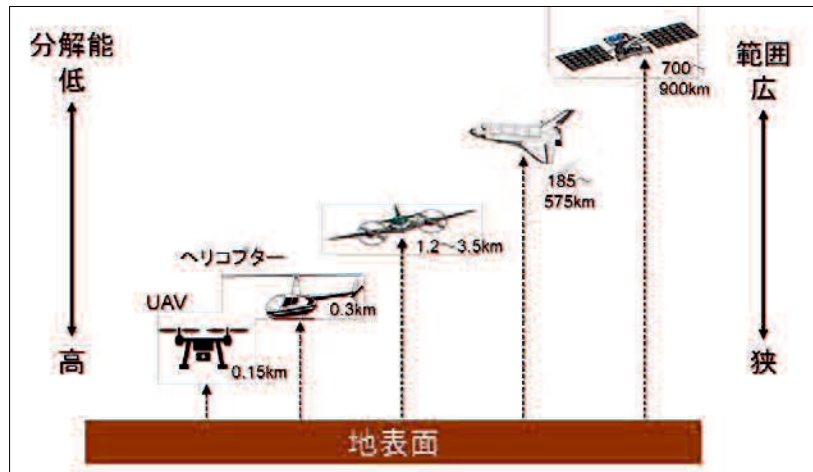


図-1.11 リモートセンシングの種類と特徴

### 1.3.2 観測機器（センサ）の特徴

衛星リモートセンシングには、観測機器（センサ）の観点から大きく“光学センサ”と“合成開口レーダ（Synthetic Aperture Radar : SAR）”の2種類に分類される。

光学センサとは、対象物から反射または放射される太陽光を利用して観測を行うセンサである<sup>15)</sup>。一方、SARとはセンサ自身が対象物にマイクロ波を照射して、その反射波（散乱波）を観測するセンサである<sup>16)</sup>。

図-1.12に同じ場所を観測した光学センサとSARの画像を並べて示す<sup>17)</sup>。光学センサは一般的に可視域から近赤外域の情報を収集することができるため、画像（図-1.12(左)）は視認性が高く情報量が多い。しかし、太陽光を利用するため、夜間や雲がかかっている雨天時には対象地域の観測が行えないという欠点がある。一方、SARは散乱波の強度から地表面の粗度を観測するため、画像（図-1.12(右)）は視認性が低く情報量が少ない。しかし、マイクロ波を利用するため、夜間や雨天時にも観測が行える利点がある。

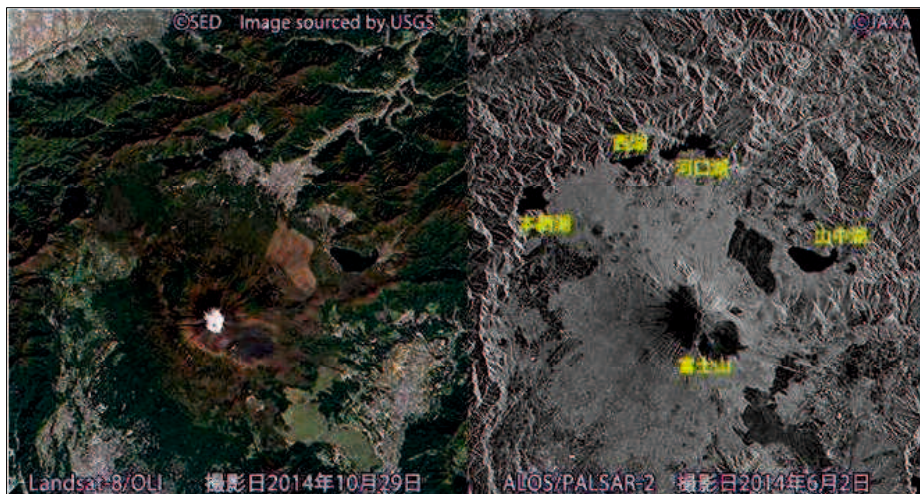


図-1.12 光学センサ画像と SAR 画像の比較<sup>17)</sup>



## 1.4 衛星画像を用いた土砂災害の検出に関する既往研究

土砂災害は豪雨や地震などを起因として発生する災害であり、被害が広範囲に及ぶ場合や同時に複数箇所で発生する場合がある。そのため、山間部では道路の途絶による集落の孤立や崩壊した斜面の土砂の流入によって河道が閉塞させる事態が発生する恐れがある。しかも、これらはアクセスが困難な山間部で発生することが多いため、その発見が遅くなることもある。

ここでは、光学センサ画像および SAR 画像を用いた土砂災害の検出に関する既往研究について説明するとともに、課題を整理する。

### 1.4.1 光学センサ画像を用いた既往研究

光学センサ画像を用いた既往研究には、例えば、三浦・翠川による IKONOS 画像を用いた新潟県中越地震における斜面崩壊地の検出がある<sup>19)</sup>。三浦らは、土砂災害の発生により森林域における植生が消失することに着目して、地震の発生前後に観測された IKONOS 画像から植生の活性度を示す正規化植生指数 (Normalized Difference Vegetation Index : NDVI)<sup>19)</sup>を算出し、地震発生前後の NDVI の差分をとることで斜面崩壊地の検出を試みている。

ここでは、斜面崩壊地を検出するにあたり、数値標高モデル (Digital Elevation Model : DEM)<sup>20)</sup>を用いて画像に対してオルソ幾何補正<sup>15)</sup>を施し、非変化地域における地震発生前後の NDVI の比較から画像の観測時期の違いによる季節変化を補正している。また、誤検出低減のために DEM から算出される傾斜角を利用し、傾斜角が 10 度未満の平地を除去している。そして、検出結果と実際の斜面崩壊地の分布との比較から斜面崩壊地を表す NDVI の差分値の閾値を求め、閾値処理により検出されたピクセル分布を 20m メッシュで評価することにより、斜面崩壊地の分布を推定している。その結果、三浦らが提案する手法は全体の 85%程度の斜面崩壊地を検出できることを示している。また、検出された領域が斜面崩壊地であるか否かを示す正解率は約 90%であり、精度良く崩壊地を検出できることを示している。

また、NDVI の差分を用いた既往研究には、石出・山崎による ALOS/AVNIR-2 画像を用いた岩手・宮城内陸地震における斜面崩壊箇所の検出がある<sup>21)</sup>。石出らは三浦らと同様に、画像の位置合わせや季節変化の補正、平地の除去といった補正処理を行った後、NDVI の差分値に平均値と標準偏差から求めた閾値を設けることで、閾値以上の値を示すピクセルを斜面崩壊地として検出を試みている。また、地震前後の画像に裸地をトレーニングデータの 1 つとする教師付き分類を行い、地震発生前後における裸地の差分からも斜面崩壊地の検出を試みている。その結果、全体の斜面崩壊箇所数のうち、NDVI による方法では約 66.5%、教師付き分類による検出では約 68.6%の斜面崩壊箇所を検出できることを示している。また、このうち、面積が 500m<sup>2</sup>以上の斜面崩壊箇所に関しては、どちらの手法においても 90%

程度検出できることを示している。

一方、NDVI の差分値以外を用いた既往研究には、筒井らによる SPOT5 のステレオペア画像を用いた 2004 年新潟県中越地震による斜面災害規模の推定がある<sup>22)</sup>。筒井らは、土砂災害の発生により斜面が削られ標高に変化が生じることに着目して、地震の発生前後に観測された SPOT5 のステレオペア画像から DEM を算出し、地震発生前後の DEM の差分をとることで斜面崩壊地の検出を試みている。ここでは、2 時期データの高さ差分の誤差が ±10m である点と対象地域の平均樹高が約 12m であることから高さ変化の閾値を ±10m とし、斜面崩壊地の検出を行っている。その結果、斜面災害の種別が“地すべり”または“崩壊”である箇所は全箇所検出できたことを示している。

その他、光学センサ画像を用いた土砂災害の検出に関する既往研究には、Chen らによる画像分類手法やテキストモデリング手法を用いた検出<sup>23)</sup>、Dou らによる画像分割手法や遺伝的アルゴリズムなどを用いた検出<sup>24)</sup>、瀬戸島らによるレイヤー演算手法による検出<sup>25)</sup>、齊藤らによる Decision tree による検出<sup>26)</sup>、KAAB や TOUTIN による DEM の差分を用いた検出<sup>27,28)</sup>、小畑・岩男による NDVI の差分を用いた検出<sup>29)</sup>などが行われている。

#### 1.4.2 合成開口レーダ (SAR) 画像を用いた既往研究

SAR 画像を用いた既往研究には、例えば、渡邊らによる ALOS-2/PALSAR-2 画像を用いた熊本地震における土砂災害域の検出がある<sup>30)</sup>。渡邊らは、地震の発生前後に観測された ALOS-2/PALSAR-2 のデータから 3 成分分解<sup>31)</sup>によって得られる固有値分解パラメータ  $\alpha$  と偏波間コヒーレンス  $\gamma_{HH-VV}$ <sup>32)</sup>を算出し、地震発生前後の  $\alpha$  と  $\gamma_{HH-VV}$  の値の差分をとることで土砂災害の検出を試みている。 $\alpha$  角を基準とした検出では閾値を  $40^\circ$ 、 $\gamma_{HH-VV}$  を基準とした検出では閾値を 0.5 とし、地震発生前後の変化が 0.1 以上ある場所を検出した結果、どちらの場合においても災害発生前に森林であった場所における土砂災害を精度良く検出でき、 $\alpha$  角を基準とした場合の方がより災害発生前後の違いを良く表すことを示している。

また、災害発生前後の画像の差分を用いた既往研究には、林らによる ALOS/PALSAR 画像を用いた 2008 年岩手宮城・内陸地震および 2009 年中国・九州北部豪雨における崩壊地の検出がある<sup>33)</sup>。林らは、災害発生前の 2 時期と災害発生前後のそれぞれの強度画像の相関を算出して、その差分値から崩壊地を検出する相関係数差分解<sup>34)</sup>と、HH 偏波と HV 偏波の強度の比演算で NDPI (Normalized Difference Polarization Index) を算出しその差分値から崩壊地を検出する NDPI 差分解<sup>35)</sup>の 2 通りの解析手法で崩壊地の検出を試みている。その結果、両手法でほぼ同程度の検出精度を得ることができ、10×10 メッシュ相当 (面積 10,000m<sup>2</sup>以上) の崩壊地規模は 60%以上の的中率、20×20 メッシュ相当 (面積 40,000m<sup>2</sup>以上) の崩壊地規模は 80%以上の的中率で崩壊地を検出できることを示している。

その他、SAR 画像を用いた土砂災害の検出に関する既往研究には、下村らや水野らによる SAR 画像の目視判読による土砂災害の検出<sup>36,37)</sup>、鈴木らや飛田らなどによる 2 時期 SAR

データのカラー合成画像による検出<sup>38,39)</sup>、吉川らや山崎ら、林らによる災害発生前後の SAR 強度画像の差分や相関による検出<sup>40~42)</sup>、矢来らや葛岡・水野、高岸による InSAR 解析による検出<sup>43~45)</sup>、渡邊らによる三成分散乱モデル分解を用いた検出<sup>46)</sup>、和田らによる四成分散乱モデル分解を用いた検出<sup>47)</sup>などが行われている。

### 1.4.3 既往研究における課題

既往研究の多くは、災害発生前後の 2 時期の画像の差分や相関をとることで災害による変化箇所を検出する手法が用いられている。そのため、既往研究では災害発生前後 2 時期の画像が入手できることが前提とされる。

しかし、地域によってはアーカイブ画像が少なく、光学センサの場合、雲の少ない災害発生直前の画像がない場合、既往の解析手法では解析が困難となる場合がある。また、新規衛星の打ち上げ後、アーカイブ画像が整備されるまでの間においても解析が困難となるといった課題がある。

また、雲の少ない災害発生直前の画像が入手できた場合でも、精度良く災害発生域を検出するためにはいくつかの補正処理を行う必要がある。例えば、画像の位置合わせを行っていない画像間では平均的に約13mの位置ずれが生じるため<sup>48)</sup>、DEMを用いたオルソ補正を行わなければならない。また、2時期の画像の観測時期が異なる場合、一般的に災害などの影響がない地域においても季節的な変化が画像にみられるため<sup>47)</sup>、災害発生前後の画像において輝度値の補正を行わなければならない。これらの補正処理はデータセット毎に行う必要があるため、多くの画像を処理しなければならない大規模災害発生時には解析に労力と時間が必要となるといった課題がある。

一方、SAR画像の三成分散乱モデル分解を用いた検出手法や四成分散乱モデル分解を用いた検出手法は、災害発生後のみの単画像からでも解析を行うことが可能であるが、これらの手法で用いられる画像は処理過程において分解能が低下するため細部の判読に適さなかったり、処理に時間を要するといった課題がある<sup>38)</sup>。

すなわち、既往研究では2時期の画像が入手できる場合や少量の画像を処理する場合については様々な手法が検討されているが、アーカイブ画像が入手できない場合や大量の画像を処理する場合の手法については十分な検討が必要だと言える。

## 1.5 研究目的

本研究では、災害発生前のアーカイブ画像が入手できない場合やデータセット毎の補正処理を必要としない解析手法の開発を目的とし、災害発生後のみの衛星画像（光学センサおよび SAR）から災害発生域、ここでは土砂災害発生域を検出する手法の開発を行う。また、本研究で開発する検出手法の特徴を整理し、各検出手法の有効性について検証する。

具体的には、一般的な指標である NDVI や単偏波の画像から土砂災害を検出するための閾値を求め、それぞれの画像の閾値を用いた検出手法の開発を行う。また、Band や偏波を組み合わせることで土砂災害の検出に有効となる新たな指標の開発を行う。過去の災害事例を対象に解析を行うことで、土砂災害を検出するための条件やそれぞれの検出手法の特徴について整理することで、新たに災害が発生した際には災害発生後の単一の画像からでも土砂災害を検出できるようにする。

2020 年には ALOS や ALOS-2 の後継機となる ALOS-3 や ALOS-4 の打ち上げが予定されており、新規衛星打ち上げ後、アーカイブ画像が揃う前に災害が発生することも想定される。本研究で開発する手法は、このような場合における土砂災害の検出に有効な手段となると考えられる。

また、本研究で開発する手法は従来の手法とは異なり、データセット毎の前処理を必要としないため、機械学習におけるトレーニングデータを作成することができ、衛星画像の自動処理に貢献できると考えられる。

## 1.6 論文の構成と概要

本研究は、災害発生後の光学センサ画像および SAR 画像から土砂災害を検出する手法の開発を行ったものである。手法は光学センサ画像を用いた手法 2 種類と SAR 画像を用いた手法 3 種類であり、それぞれの検出手法における土砂災害の検出条件と検出結果の特徴について整理する。図-1.13 に本論文の構成を示し、以下に各章の概要を説明する。

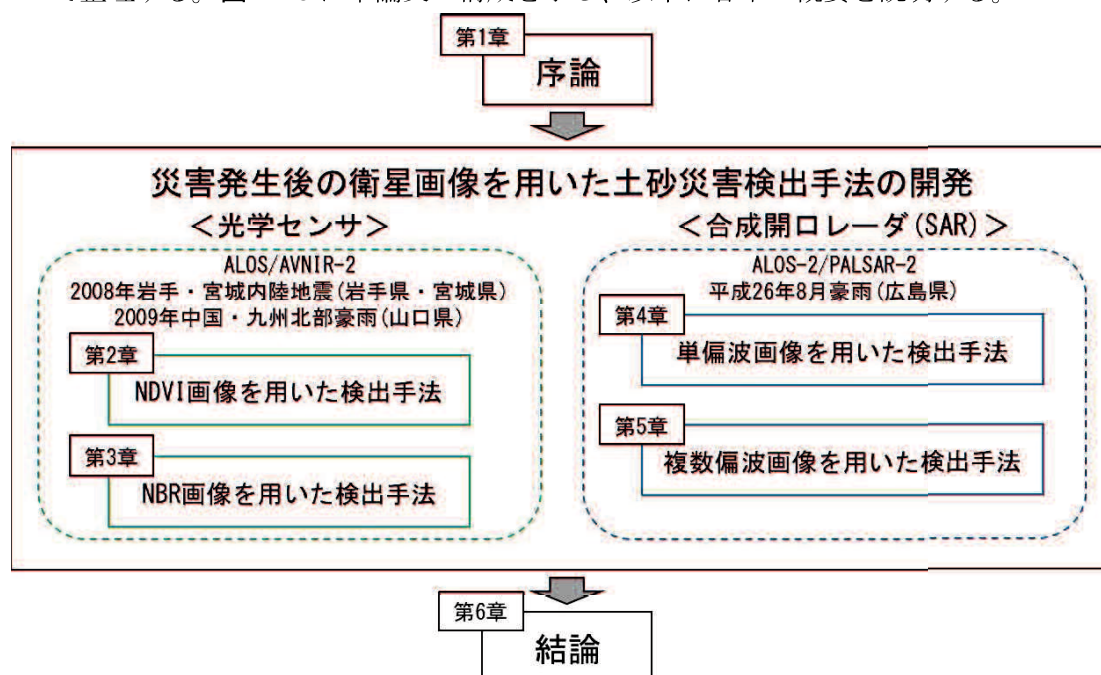


図-1.13 論文構成

**第 1 章**では、日本の自然災害と災害発生時における災害対応の現状と課題についてまとめることで、本研究の背景について説明する。また、光学センサ画像および SAR 画像を用いた土砂災害の検出に関する既往研究の概要と課題について整理することで、本研究の目的について説明する。

**第 2 章**では、災害発生後の光学センサ画像を用いた土砂災害の検出手法として、2008 年岩手・宮城内陸地震および 2009 年中国・九州北部豪雨における土砂災害を対象として、災害発生後に観測された ALOS/AVNIR-2 データを用いて検出を試みる。ここでは、土砂災害の検出において一般的に用いられる NDVI を指標として用いて、検出条件や検出結果についてまとめる。

**第 3 章**では、第 2 章と同じ災害事例を対象として同じデータセットを用いて、土砂災害の検出に有効となる新しい指標の開発および新しい指標を用いた検出を試みる。ここでは、NIR, Blue, Red の 3Band を組み合わせて算出する NBR を新しい指標として考案し、NBR を指標として用いて検出条件や検出結果についてまとめる。また、NDVI 画像を用いた手法と比較検討することで、それぞれの検出手法の特徴について整理する。

**第 4 章**では、災害発生後の SAR 画像を用いた土砂災害の検出手法として、平成 26 年 8 月豪雨における土砂災害を対象として、災害発生後に観測された ALOS-2/PALSAR-2 データを用いて検出を試みる。ここでは、4 種類（HH, HV, VH, VV）の単偏波画像を用いて、土砂災害の検出条件や検出結果についてまとめる。

**第 5 章**では、第 4 章と同じ災害事例を対象として同じデータセットを用いて、土砂災害の検出に有効となる新しい指標の開発および新しい指標を用いた検出を試みる。ここでは、4 種類（HH, HV, VH, VV）の中から 2 偏波を組み合わせた 2 偏波演算画像と 4 偏波を組み合わせた 4 偏波演算画像を用いて検出条件や検出結果についてまとめる。また、単偏波画像を用いた手法と比較検討することで、それぞれの検出手法の特徴について整理する。

**第 6 章**では、本研究の総括として前章までに得られた成果を要約することで、各検出手法の特徴や有効性について整理する。また、本研究における課題と将来の展望について説明する。

## 参考文献

- 1) 国土交通省気象庁：地震発生のしくみ, [https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/jishin/about\\_eq.html](https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/jishin/about_eq.html).
- 2) 福和伸夫：Special Feature Interview, <http://www.sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp/data/fukuwa/paper-pdf/1109today.pdf#search=%27%E4%B8%89%E9%99%B8%E6%B2%96+%E5%8D%97%E6%B5%B7+%E5%91%A8%E6%9C%9F%27>.
- 3) 日本気象協会：過去の地震情報 震度 5 弱以上, <https://earthquake.tenki.jp/bousai/earthquake/entries/level-5-minus/>.
- 4) 鹿児島地方気象台：梅雨の降水量, [https://www.jma-net.go.jp/kagoshima/forecast/tenkou/TenkouKaisetsuHeinenColumn1\\_S-Kyushu.html](https://www.jma-net.go.jp/kagoshima/forecast/tenkou/TenkouKaisetsuHeinenColumn1_S-Kyushu.html).
- 5) 国土交通省気象庁：台風の上陸数（2018年までの確定値と2019年の速報値）, <https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typhoon/statistics/landing/landing.html>.
- 6) 国土交通省気象庁：大雨や猛暑日など（極端現象）のこれまでの変化, [http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme\\_p.html](http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html).
- 7) 国土交通省砂防部：土砂災害発生事例, <http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sabo/jirei.html>.
- 8) 消防本部指令課：東北地方太平洋沖地震 災害活動経過概要（3月11日から3月17日まで）.
- 9) 松岡昌志：高分解能衛星による災害監視の可能性, 日本損害保険協会, 予防時報, 第217巻, pp.8-13, 2004.
- 10) 山崎文雄：防災におけるリモートセンシング技術利用の最新動向, 土木学会第10回地震災害マネジメントセミナー「地震災害対応におけるリモートセンシング・テクノロジーの活用—先端技術による被害軽減の現状と課題—」, ISBN978-4-8106-0686, pp.1-12, 2009.
- 11) Eguchi, R.T., Huyck, C.K., Houshmand, B., Mansouri, B., Shinozuka, M. Yamazaki, F., and Matsuoka, M : The Marmara Earthquake -A View from space- The Marmara, Turkey Earthquake of August 17, 1999: Reconnaissance Report, Technical Report MCEER-00-0001, pp.151-169, 2000.
- 12) 東京大学生産技術研究所都市基盤安全工学国際研究センター, 一般社団法人日本リモートセンシング学会：大規模災害におけるリモートセンシング技術活用事例に関する調査報告書, ICUS Report 2008-7.
- 13) 斉藤和也, 沼田洋一, 島村秀樹, 朱林, 赤松幸生, 中山裕則, 宮崎早苗：大規模災害におけるリモートセンシング技術活用事例の調査, 生産研究, 第61巻, 第4号, pp.773-779, 2009.
- 14) 林真一郎, 内田太郎, 桂真也, 笠井美青, 小山内信智, 丸太知己：被害が広域に及ぶ大規模な土砂災害に対する調査技術の活用事例に基づく定量的分析, 日本地すべり学会誌, 地すべり, 第54巻, 第2号, pp.54-61, 2017.
- 15) 一般社団法人日本リモートセンシング学会：基礎からわかるリモートセンシング, 理工図書株式会社出版, 2011.
- 16) 大内和夫：リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎[第2版], 東京電機大学出版局出版, 2009.
- 17) 宇宙技術開発株式会社 衛星画像データサービス：学習帳 9\_A : SAR の画像（光学とは見え方が違う SAR の画像例）, [https://www.sed.co.jp/sug/contents/edu/edu9a\\_sarexampleuse.html](https://www.sed.co.jp/sug/contents/edu/edu9a_sarexampleuse.html)
- 18) 三浦弘之, 翠川三郎：高分解能衛星画像と数値標高モデルを用いた2004年新潟県中越地震での斜面崩壊地の検出, 日本地震工学学会論文集, 第7巻, 第5号, pp.1-14, 2007.
- 19) Tucker, C. J. : Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, Remote Sensing of Environment, Vol.8, No.2, pp.127-150, 1979.
- 20) 国土交通省国土地理院：地理院地図で得られる値等について, <https://maps.gsi.go.jp/help/how-touse.html>.
- 21) 石出貴大, 山崎文雄：ALOS/AVNIR-2画像を用いた2008年岩手・宮城内陸地震における斜面崩壊の検出, 日本地震工学学会論文集, 第10巻, 第3号, pp.12-24, 2010.
- 22) 筒井健, 宮崎早苗, 六川修一, 中川英朗：高分解能衛星画像からの高精度自動標高変化抽出による2004年新潟県中越地震に伴う斜面災害規模の推定, 応用地質, 第46巻, 第

- 3号, pp.125-137, 2005.
- 23) G. Cheng, L. Guo, T. Zhao, J. Han, H. Li, and J. Fang, "Automatic landslide detection from remote-sensing imagery using a scene classification method based on BoVW and pLSA," *Int. J. Remote Sens.*, Vol.34, No.1, pp.45-59, 2013.
  - 24) J. Dou, K.-T. Chang, S. Chen, P. A. Yunus, J.-K. Liu, H. Xia, and Z. Zhu, "Automatic Case-Based Reasoning Approach for Landslide Detection: Integration of Object-Oriented Image Analysis and a Genetic Algorithm," *Remote Sens.*, Vol.7, No.4, pp.4318-4342, 2015.
  - 25) 瀬戸島政博, 白石一夫, 森大: SPOT データを用いた地すべり箇所抽出と地すべり分布図の情報更新の試み, *写真測量とリモートセンシング*, 第30巻, 第3号, pp.4-15, 1991.
  - 26) 齋藤仁, 中山大地, 松山洋: Decision tree による地すべり発生流域の推定とその検証-ASTER データを用いて-, *日本地すべり学会誌*, 第44巻, 第1号, pp.1-14, 2007.
  - 27) KAAB, A. (2002): Monitoring highmountain terrain deformation from repeated air and spaceborne optical data: examples using digital aerial imagery and ASTER data, *ISPRS J. Photogramm, Remote Sens.*, Vol.57, No.1-2, pp.39-52, 2002.
  - 28) TOUTIN, T.: Three dimensional topographic mapping with ASTER stereo data in rugged topography, *IEEE trans, geosci. Remote Sensing.*, Vol. 40, No.10, pp.2241-2247, 2002.
  - 29) 小畑健太, 岩男弘毅: 平成28年熊本地震に起因する斜面崩壊と ASTER データにおける NDVI 変化の関係, *Journal of The Remote Sensing Society of Japan*, 第36巻, 第4号, pp.417-420, 2016.
  - 30) 渡邊学, 米澤千夏, 園田潤, 島田政信: L-band SAR (PALSAR-2) を用いた, "広域データ" からの土砂災害域検出, *日本リモートセンシング学会誌*, 第37巻, 第1号, pp.21-26, 2017.
  - 31) A. Freeman and S.L. Durden: A three-component scattering model for polarimetric SAR data, *IEEE Trans, Geosci, Remote Sensing*, Vol.36, No.36, pp.963-973, 1998.
  - 32) M. Shimada, M. Watanabe, N. Kawano, M. Ohki, T. Motooka, W. Wada: Detecting mountainous landslides by SAR polarimetry: A comparative study using Pi-SAR-L2 and X band SARs. *Trans. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci., Aerosp. Technol. Jpn.* Vol. 12, No.29, pp.9-15, 2014.
  - 33) 林真一郎, 水野正樹, 小山内信智, 西真佐人, 清水孝一, 中川和男, 松本定一: ALOS (だいち) 合成開口レーダーを用いた崩壊地抽出手法と適用性, *砂防学会誌*, 第65巻, 第4号, pp.3-14, 2012.
  - 34) Matsuoka, M. and Yamazaki, F.: Use of Satellite SAR Intensity Imagery for Detecting Building Areas Damaged due to Earthquakes, *Earthquake Spectra*, Vol.20, No.3, pp.975-994, 2004.
  - 35) CAO Yun-ganga, YAN Li-juanb, ZHENG Zezhonga: EXTRACTION OF INFORMATION ON GEOLOGY HAZARD FROM MULTIPOLARIZATION SAR IMAGES, *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXVII. Part B4p, pp.1529-1532, 2008.
  - 36) 下村博之, 朝比奈利廣, 鶴殿俊昭, 横田浩, 鈴木崇, 野田敦夫: 高解像度合成開口レーダー画像でみた中国四川省地震による土砂移動状況, *砂防学会誌*, 第61巻, 第2号, pp.68-69, 2008.
  - 37) 水野正樹, 江川真史, 神山嬢子, 佐藤匠, 蒲原潤一: 衛星多偏波 SAR 画像による大規模崩壊の緊急判読調査手法, *土木技術資料*, 第55巻, 第11号, pp.35-38, 2013.
  - 38) Suzuki, T., Shibayama, T., and Udono, T.: High resolution SAR images of landslides triggered by Sichan and Iwate-Miyagi earthquake, *The First World Landslide Forum*, 2008.
  - 39) 飛田幹男, 今給黎哲郎, 水藤尚, 加藤敏, 林文, 村上亮: 衛星 SAR 画像分析による2004・2005年スマトラ沖地震に伴う隆起沈降域の把握, *国土地理院時報*, 第109巻, 第1号, pp.21-32, 2006.
  - 40) 吉川和男, 野中崇志, 柴山卓史: TerraSAR-X による災害モニタリング—2009年防府市で発生した土石流災害・駿河湾沖を震源とする地震について—, *日本写真測量学会平*

- 成 21 年度秋季学術研究発表論文集, pp.81-82, 2009.
- 41) Yamazaki, F., Liu, W. and Inue, H. : Characteristics of SAR backscattered intensity and its application to earthquake damage detection, *Computational Stochastic Mechanics*, pp.602-606, 2011.
  - 42) 林真智, 豊山孝子, 斉藤和也, 清水孝一, 山越隆雄 : SAR データを利用した土砂災害の観測, *日本リモートセンシング学会学術講演会論文集*, 第 29 卷, pp.73-74, 2000.
  - 43) 矢来博司, 中川弘之, 飛田幹男, 村上亮, 藤原智 : RADARSAT/SAR データ干渉処理による地殻変動検出の試み—2000 年鳥取県西部地震の地殻変動—, *地震第 2 輯*, 第 54 卷, 第 4 号, pp.535-546, 2002.
  - 44) 葛岡成樹, 水野敏実 : PSInSAR 技術の非都市部地表面変動計測への適用, *日本リモートセンシング学会誌*, 第 24 卷, 第 2 号, pp.140-152, 2004.
  - 45) 高岸且 : 高分解能 SAR 衛星 TerraSAR-X を用いたイムジャ氷河湖のモニタリング, ヒマラヤにおける氷河と氷河湖決壊洪水に関する研究集会, 2010.
  - 46) 渡邊学, 島田政信, 森山敏文, 田殿武雄 : PALSAR と PiSAR (L バンド) データを用いた土石流箇所を検出の試み, *日本リモートセンシング学会誌*, 第 27 卷, 第 4 号, pp.386-393, 2007.
  - 47) 和田裕, 山口芳雄, 大倉博, 鵜川元雄 : ALOS-PALSAR 多偏波データを用いた火山島の地表面状況の観測, *日本リモートセンシング学会学術講演会論文集*, 2007.
  - 48) 三浦弘之, 翠川三郎 : 高分解能衛星画像にみられる 2004 年新潟県中越地震での斜面災害発生箇所の特徴, 第 12 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.1514-1517, 2006.



## 2 災害発生後の NDVI 画像を用いた土砂災害検出手法

### 2.1 緒言

第1章で述べたように、光学センサ画像を用いた既往研究では、一般的に災害発生前後に観測された2時期の画像の差分や相関の変化から災害発生域を検出する手法が用いられている<sup>1-5)</sup>。特に、土砂災害に関しては、土砂災害の発生により植生が消失するという観点から、正規化植生指数 (Normalized Difference Vegetation Index : NDVI) <sup>6)</sup>が検出の指標として用いられることが多い<sup>7-9)</sup>。

そこで、ここでは、NDVIを用いて災害発生後の光学センサ画像から土砂災害を検出することを試みる。具体的には、2008年岩手・宮城内陸地震<sup>10)</sup>と2009年中国・九州北部豪雨<sup>11)</sup>において発生した土砂災害を対象として、災害発生後に観測された ALOS/AVNIR-2<sup>12)</sup>データを用いて検出を試みる。

### 2.2 解析対象

以下に、本章で対象とする 2008 年岩手・宮城内陸地震と 2009 年中国・九州北部豪雨の概要について説明する。

#### 2.2.1 2008 年岩手・宮城内陸地震

2008 年 6 月 14 日に岩手県内陸南部を震源とする M7.2 の地震が発生した。この地震により、岩手県南部や宮城県北部、秋田県南部では震度 5 強を超える激しい揺れに襲われ、揺れが大きかった岩手県、宮城県、秋田県、山形県、福島県の 5 県では、約 2,700 棟の家屋が被害に遭い、26 名に上る死者・行方不明者が出る結果となった<sup>10)</sup>。

また、山間部では約 3,500 箇所もの場所で斜面崩壊や地すべりといった土砂移動現象が発生しており、その中には、長さ約 1,300m、幅約 900m、最大深さ約 150m 以上の大規模斜面崩壊もある<sup>13)</sup>。そのため、岩手県や宮城県の山間部ではこれらの土砂移動によって河川の堰き止めや道路の寸断などが各所で発生した<sup>14)</sup>。

図-2.1 はアジア航測株式会社によって撮影された、宮城県栗原市の荒砥沢ダム上流部で発生した大規模斜面崩壊の様子を捉えた航空写真である<sup>15)</sup>。ここでは、斜面崩壊によって大量の土砂がダムへと流入したことで、一時的にダムが決壊の危険に直面した。



図-2.1 宮城県栗原市荒土沢ダム周辺で発生した土砂災害の様子<sup>15)</sup>

### 2.2.2 2009年中国・九州北部豪雨

2009年7月19日から26日にかけて、活発な梅雨前線の活動により中国地方や九州地方の広い範囲で、1時間降水量が100mmを超える記録的な大雨が降った<sup>11)</sup>。この大雨により、福岡県では福岡空港の滑走路が冠水し欠航がでるなどの影響があった他、佐賀県では巨勢川・金立川の堤防が決壊し住家の浸水被害などが発生した。

図-2.2 はアジア航測株式会社によって撮影された、山口県防府市の真尾地区で発生した土石流による被害の様子を捉えた航空写真である<sup>16)</sup>。ここでは、特別養護老人ホームが土石流の被害にあった。また、別の場所では、土石流によって国道262号線が通行止めとなるなどの被害が発生した。



図-2.2 山口県防府市真尾地区で発生した土砂災害の様子<sup>16)</sup>

## 2.3 使用データ

### 2.3.1 衛星データ

本章では、ALOS/AVNIR-2 のデータを用いて土砂災害の検出を試みる。

ALOS とは、宇宙航空研究開発機構（Japan Aerospace eXploration Agency : JAXA）が打ち上げた陸域観測技術衛星 Advanced Land Observing Satellite : ALOS（日本名：だいち）のことで、地図作成や地域観測、災害状況把握、資源調査などへの貢献を目的とした世界最大級の地球観測衛星である<sup>12)</sup>。図-2.3 に ALOS の概要図、表-2.1 に ALOS の主要諸元をそれぞれ示す。なお、表-2.1 は、JAXA が公開している情報<sup>12)</sup>から一部抜粋したものである。

ALOS には、①PRISM、②AVNIR-2（Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2）、および③PALSAR（Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar）の3種類のセンサが搭載されており、2006年1月24日にH-IIAロケットで打ち上げられて以降、2011年5月の運用終了までに多くのデータを取得してきた。

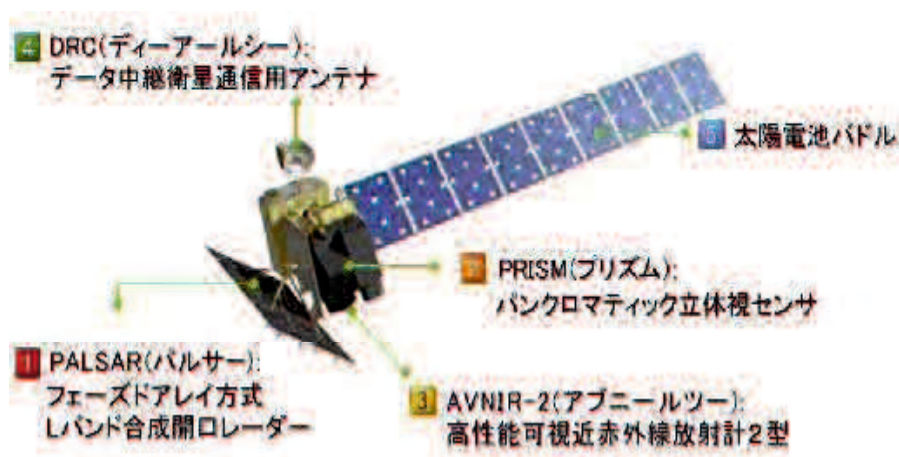


図-2.3 ALOS の概要<sup>12)</sup>

表-2.1 ALOS の主要諸元<sup>12)</sup>

打ち上げ日	2006年1月24日
打ち上げ機	H-IIA ロケット
設計寿命	3~5年
軌道	太陽同期 準回帰軌道
	回帰日数：46日 サブサイクル：2日
	傾斜角：98.16°

図-2.4 に本章で使用する AVNIR-2 のイメージ図、表-2.2 に AVNIR-2 の主要諸元を示す。  
 なお、表-2.2 は表-2.1 と同様に公開されている情報<sup>12)</sup>から一部抜粋したものである。

AVNIR-2 は、地球観測プラットフォーム技術衛星 (ADEOS) に搭載された AVNIR の分解能をさらに向上させたもので、可視・近赤外域の観測波長を用いて、主に陸域、沿岸域を観測することにより地域環境監視等に必要な土地被覆分類図、土地利用分類図等の作成を行う受動型センサである。70km (直下) の観測幅を 10m (直下視) の分解能で観測することができるほか、センサを傾けて観測するポインティング機能を有しているため、災害発生時には直下方向だけでなく、通常とは異なる角度で被災地を緊急観測することができる。そのため、ALOS 本来の回帰日数よりも早いタイミングで被災地を観測することが可能である。

本章では災害発生後に観測された画像の中からもなるべく災害発生日に近く、かつ、雲の少ない画像として表-2.3 に示す画像を使用する。画像はラジオメトリック補正と幾何補正が施された処理レベル 1B2 の画像である。

ALOS は 2011 年 5 月に運用を停止してしまっただが、運用停止までの期間、2004 年新潟県中越沖地震や 2011 年東北地方太平洋沖地震などにおいて多くの災害状況を観測してきた。一方、ALOS のミッションを引き継ぐ衛星として、2020 年には ALOS-3 が打ち上げら

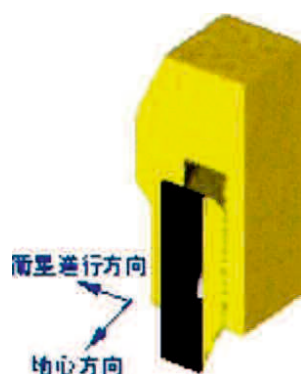


図-2.4 AVNIR-2 の概要<sup>12)</sup>

表-2.2 AVNIR-2 の主要諸元<sup>12)</sup>

バンド数	4
観測波長帯	Band1 : 0.42~0.50 $\mu$ m Band2 : 0.52~0.60 $\mu$ m Band3 : 0.61~0.69 $\mu$ m Band4 : 0.76~0.89 $\mu$ m
地上分解能	10m (直下視)
観測幅	70km (直下)
ポインティング角	$\pm 44^\circ$ (3方向視モード、クロストラック方向)

表-2.3 使用する ALOS/AVNIR-2 データ

災害事例	データの観測日	分解能	ポインティング角	処理レベル
2008年岩手・宮城内陸地震	2008年7月2日 (発災約1ヶ月後)	10m	-2.5	1B2
2009年中国・九州北部豪雨	2009年7月23日 (発災直後)	10m	17.0	1B2

れる予定である<sup>17)</sup>。そのため、過去の災害事例に対して ALOS のデータを用いて解析手法を検討しておくことは、今後、災害発生時に ALOS-3 のデータを有効活用する上で非常に重要となる。

### 2.3.2 その他データ

本章では、解析をするにあたり衛星データ以外のデータとして表-2.4 に示すデータを使用する。それぞれのデータの入手元と本章における使用用途は以下の通りである。

植生調査結果<sup>18)</sup> (以下、植生図と呼ぶ) とは、自然環境局生物多様性センターによって取りまとめられた植生の分布を示す地図であり、本章では植生が分布する領域を特定する際に使用する。

地理院地図<sup>19)</sup>とは、国土地理院が公開している地形図、写真、標高、地形分類、災害情報などの情報を集約したウェブ地図であり、本章では河川や湖沼などの水域、斜面崩壊などによって土砂移動が生じた領域 (以下、土砂移動域と呼ぶ) を特定する際に使用する。

数値標高モデル (Digital Elevation Model : DEM)<sup>20)</sup>とは、国土地理院が提供している 5m メッシュの標高データであり、本章では都市域のマスク処理の際に使用する。

崩壊・地すべり等判読図<sup>21)</sup>や垂直写真判読図<sup>22)</sup> (以下、災害判読図と呼ぶ) とは、アジア航測株式会社や国際航業株式会社によって作成された斜面崩壊などの分布を示す地図であり、本章では土砂移動域を特定する際に使用する。

表-2.4 その他データ

データ	入手元	使用用途
植生調査結果 (植生図) <sup>18)</sup>	環境省自然環境局生物多様性センター	植生域の特定
地理院地図 <sup>19)</sup>	国土交通省国土地理院	水域・土砂移動域の特定
数値標高モデル (DEM) <sup>20)</sup>		都市域のマスク処理
崩壊・地すべり判読図 <sup>21)</sup> 垂直写真判読図 (災害判読図) <sup>22)</sup>	アジア航測株式会社, 国際航業株式会社	土砂移動域の特定

## 2.4 解析手順

土砂災害とは、斜面崩壊や地すべりなどの土砂移動現象によって人や道路などの構造物が被害を受けることで発生する災害である。そこで、ここでは、土砂災害の原因となる山の斜面において土砂移動が生じた箇所（以下、土砂移動箇所）の位置と範囲を災害発生後の衛星画像から特定することで土砂災害の検出を試みることにする。

なお、筆者は代表的な指標である正規化土壌指数（Normalized Difference Soil Index : NDSI）<sup>23)</sup>や正規化水指数（Normalized Difference Water Index : NDWI）<sup>24)</sup>の画像を用いた土砂災害の検出についても試みてきた。それらによると、3種類の指標のうち、土砂移動域が示す値が場所や時期によらず概ね一定であるのは NDVI であることがわかった。そこで、本章では NDVI を検出の指標として用いることにする。

図-2.5 に災害発生後の NDVI 画像を用いた土砂移動箇所の検出とその検出結果の評価までの流れを示す。

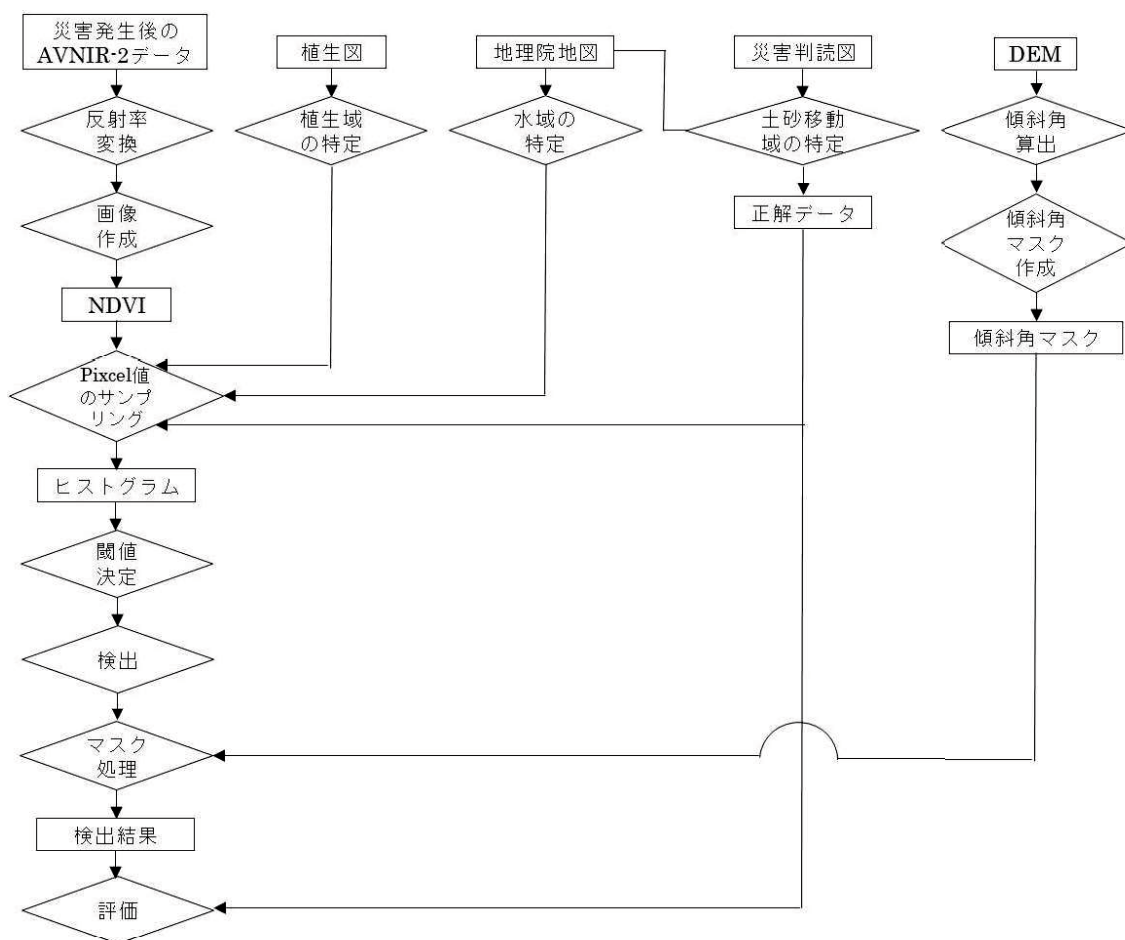


図-2.5 NDVI 画像を用いた土砂移動箇所の検出とその結果評価までの流れ



まず、式(2.1)を用いて災害発生後の AVNIR-2 のデジタルナンバー (Digital Number :  $DN$ ) を反射率  $R_\lambda$  に変換する。これにより、画像のピクセル値が同じ基準に統一され、観測条件の異なる画像同士の数値を比較することができるようになる<sup>25)</sup>。

$$R_\lambda = \frac{(L_\lambda * \pi * d^2)}{(ESUN_\lambda * \cos\theta_z)} \quad (2.1)$$

ここに、 $L_\lambda$  は放射輝度、 $d$  は太陽-地球間距離、 $ESUN_\lambda$  は大気圏外分光放射照度、 $\theta_z$  は太陽天頂角である。

このうち、 $L_\lambda$  は式(2.2)を用いて算出する。

$$L_\lambda = a * DN + b \quad (2.2)$$

ここに、 $a$ ,  $b$  は放射輝度変換係数、 $DN$  は衛星データのデジタルナンバーである。

次に、土砂移動箇所を検出する際に用いる  $NDVI$  画像を作成する。 $NDVI$  は式(2.3) に反射率変換後の数値を代入することで算出する。

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)} \quad (2.3)$$

ここに、 $NIR$  は近赤外線 (NIR) の反射率、 $Red$  は可視光線 (赤) の反射率である。また、 $NDVI$  は -1 から +1 までの値をとり、値が大きくなるほどピクセル内の植生の活性度が高いことを示す指標である。

次に、 $NDVI$  画像において確実に土砂移動域・植生域・水域である領域のピクセル値をサンプリングし、各領域のヒストグラムを作成後、それらを図-2.6 のように重ねて 1 枚の図にまとめる<sup>26)</sup>。ヒストグラムはそれぞれ赤色が土砂移動域 (Soil)、緑色が植生域 (Vegetation)、青色が水域 (Water) を示す。ここで、画像中には土砂移動域以外にも植物が生えた領域や水がある領域、建物がある領域など様々な土地被覆の領域がある中、土砂移動域、植生域、水域の 3 種類の領域のみからピクセル値をサンプリングする理由は、先行研究<sup>26~28)</sup>の結果より、 $NDVI$  画像を用いて土砂災害を検出する場合、土砂移動域と植生域、水域の 3 種類の領域のピクセル値の情報があれば検出が可能であるという結果が得られているためである。なお、土砂移動域のサンプリングにはアジア航測株式会社や国際航業株式会社によって作成された災害判読図を参照データとして用い、植生域には自然環境局生物多様性センターの植生図、水域には国土地理院の地理院地図を用いる。

次に、以上のように作成した各領域のヒストグラムから土砂域を検出するための閾値を決定する。前述したように  $NDVI$  画像では各領域のピクセルは概ね異なる値を示す。しか

し、図-2.6 のヒストグラムの重なりからわかるように、異なる領域にも関わらず同じ値を示すピクセルが存在する。そのため、単純に土砂移動域が示す値の最大値と最小値を閾値とすることができない。そこでここでは、ヒストグラムの交点、すなわち、ヒストグラムの頻度が概ね同じとなるピクセル値を閾値とする。

ヒストグラムより求めた閾値を基に土砂移動箇所をピクセル単位で検出する。本章では土砂移動箇所の検出は面積を基準として行い、実際の土砂移動箇所の面積に対して 30%以上のピクセルを検出できた場合はその土砂移動箇所を検出できた（検出成功）と判断し、30%未満の場合は検出できなかった（検出失敗）と判断する。本章で対象とする 2008 年岩手・宮城内陸における実際の土砂移動箇所は、図-2.7 に示すように 1,000~2,500m<sup>2</sup>の土砂

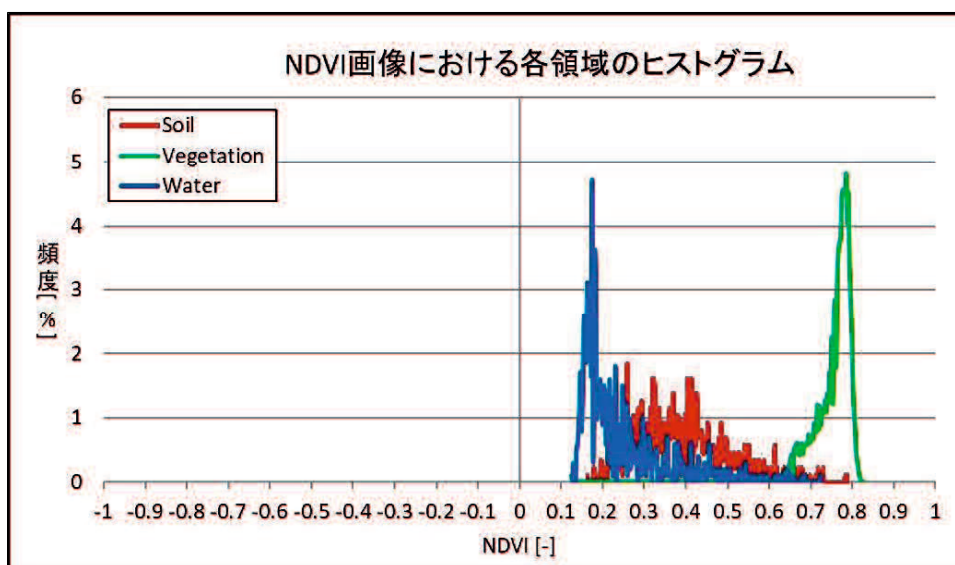


図-2.6 NDVI 画像における土砂移動域・植生域・水域のヒストグラム

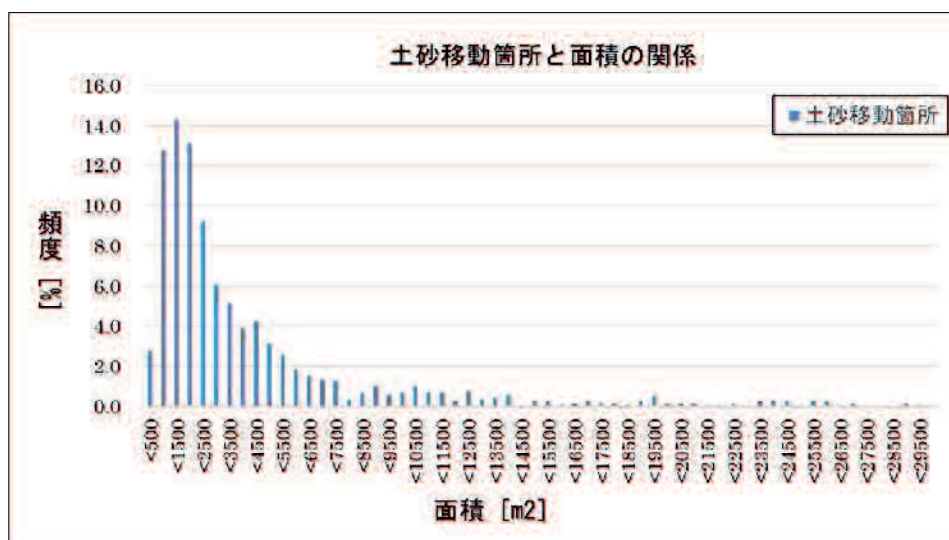


図-2.7 2008 年岩手・宮城内陸地震における面積別の土砂移動箇所数



移動箇所が多く、特に 1,500~2,000 m<sup>2</sup>のものが多く。一方、筆者らの先行研究から、目視による検出では面積が 5 ピクセル（ここでは 500m<sup>2</sup>）以下の土砂移動箇所の検出は困難であるという結果が得られている<sup>26~28</sup>。以上より、検出できると考える土砂移動箇所の面積 500m<sup>2</sup>は 1,500~2,000 m<sup>2</sup>の約 30%の面積であることから、ここでは 30%を検出基準とした。

そして、平地の裸地や都市域などにおける誤検出を除去するために傾斜角によるマスク処理を施す。マスク処理に使用する傾斜角データは国土地理院が提供している 5m メッシュの DEM データを基に作成する。また、過去の災害事例では、傾斜が 15 度以上になると土砂災害の発生件数が多くなり、30 度から 60 度程度までが最も多く、10 度未満のものはほとんどないことが報告されていることから<sup>29</sup>、ここではマスクする領域を傾斜角が 10 度未満の領域とする。

最後に、平地の誤検出を除去した検出結果の精度評価を行う。ここでは、検出結果と災害判読図を基に作成した正解データ（実際の土砂移動箇所のデータ）を比較し、実際の土砂移動箇所をどの程度検出できたかを示す検出率（再現率）<sup>30</sup>と検出結果がどの程度正しいかを示す正答率（適合率）<sup>30</sup>で評価する。なお、検出率と正答率は表-2.5 に示す検出結果を用いて式(2.4),(2.5)で算出する。ここで、表中の  $\bigcirc true$  は実際の土砂移動箇所、 $\bigcirc result$  は検出できた土砂移動箇所、 $\times true$  は実際には発生していない土砂移動箇所、 $\times result$  は検出できなかった土砂移動箇所である。

表-2.5 検出結果の例

		正解データ	
		$\bigcirc true$	$\times true$
検出結果	$\bigcirc result$	$TP$	$FP$
	$\times result$	$FN$	

$$\text{検出率} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2.4)$$

$$\text{正答率} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2.5)$$

ここに、 $TP$ は True Positive（検出できた実際の土砂移動箇所の数）、 $FP$ は False Positive（誤って検出した土砂移動箇所の数）、 $FN$ は False Negative（検出できなかった実際の土砂移動箇所の数）である。

## 2.5 検出結果と考察

### 2.5.1 各地区を対象とした場合の検出結果と考察

はじめに、2008年岩手・宮城内陸地震と2009年中国・九州北部豪雨において特に土砂災害による被害が大きかった地区の土砂移動箇所の検出結果について説明する。解析対象とした地区は、2008年岩手・宮城内陸地震では河道閉塞が形成されるなどした4地区（市野々原地区、浅布地区、荒砥沢ダム地区、駒ノ湯地区）、2009年中国・九州北部豪雨では道路の寸断や人的被害があった3地区（真尾地区、下右田地区、奈美地区）とした。各解析対象地区を表-2.6と表-2.7に示す。また、各対象地区の位置と範囲を図-2.8と図-2.9に示す。

表-2.6 2008年岩手・宮城内陸地震における解析対象地区

番号	解析対象地区	略称
①	岩手県一関市市野々原地区	市野々原地区
②	宮城県栗原市浅布地区	浅布地区
③	宮城県栗原市荒砥沢ダム地区	荒砥沢ダム地区
④	宮城県栗原市駒ノ湯地区	駒ノ湯地区

表-2.7 2009年中国・九州北部豪雨における解析対象地区

番号	解析対象地区	略称
①	山口県防府市真尾地区	真尾区
②	山口県防府市下右田地区	下右田地区
③	山口県防府市奈美地区	奈美地区



図-2.8 2008年岩手・宮城内陸地震における解析対象地区の位置と範囲



図-2.9 2009年中国・九州北部豪雨における解析対象地区の位置と範囲

次に、地区毎に求めた土砂移動箇所を検出するための閾値を表-2.8 と表-2.9 に示す。なお、ここでは対象地区において、河川や湖沼などの水域が存在しない場合や水域の面積が狭いなどの理由により確実に水域である領域の値をサンプリングすることができない場合、土砂移動箇所を検出するための下限の閾値をヒストグラムの交点から求めることができない。そこで、ここでは浅布地区、駒ノ湯地区、下右田地区における下限の閾値を一律で-1.0とした。

図-2.10 から図-2.13 に 2008 年岩手・宮城内陸地震、図-2.14 から図-2.16 に 2009 年中国・九州北部豪雨における各地区の土砂移動箇所の検出結果を示す。各画像は TrueColor 合成画像の上に検出結果をオーバーレイしたもので、黄色枠で囲んだ領域が災害判読図を基に作成した実際の土砂移動箇所、赤く表示した領域が閾値を基に検出した土砂移動箇所を示す。なお、各画像の範囲は概ね 2km×2.5km の範囲である。

また、2009年中国・九州北部豪雨における3地区では、厚い雲によって地表面の様子を確認することができない場所が多くみられた。そこで、確実に雲である領域の約 5,000 ピク

表-2.8 2008年岩手・宮城内陸地震における土砂移動箇所を検出するための各地区の閾値

領域\地区	市野々原地区	浅布地区	荒砥沢ダム地区	駒ノ湯地区
土砂移動箇所	0.22~0.65	-1.0~0.60	0.08~0.61	-1.0~0.60

表-2.9 2009年中国・九州北部豪雨における土砂移動箇所を検出するための各地区の閾値

領域\地区	真尾地区	下右田地区	奈美地区
土砂移動箇所	0.14~0.50	-1.0~0.47	0.15~0.54

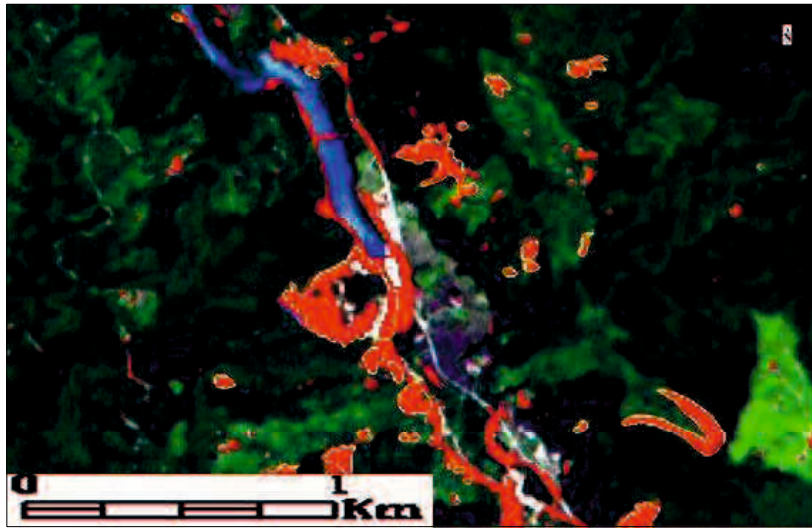


図-2.10 市野々原地区における検出結果

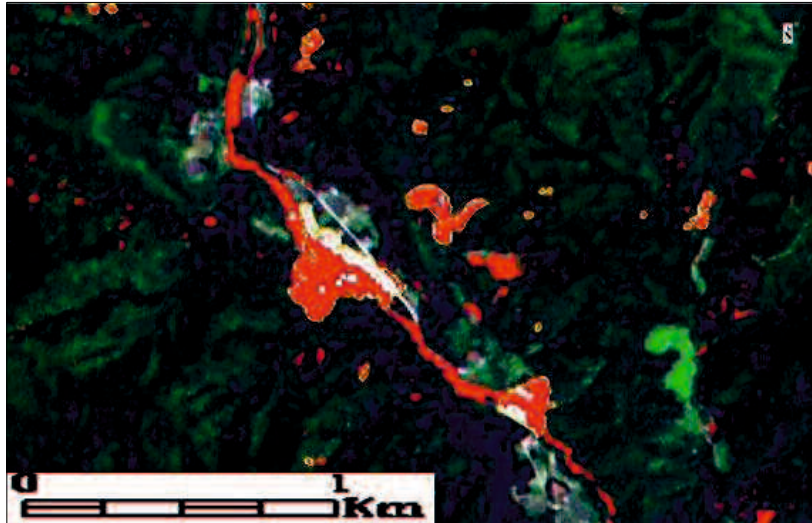


図-2.11 浅布地区における検出結果

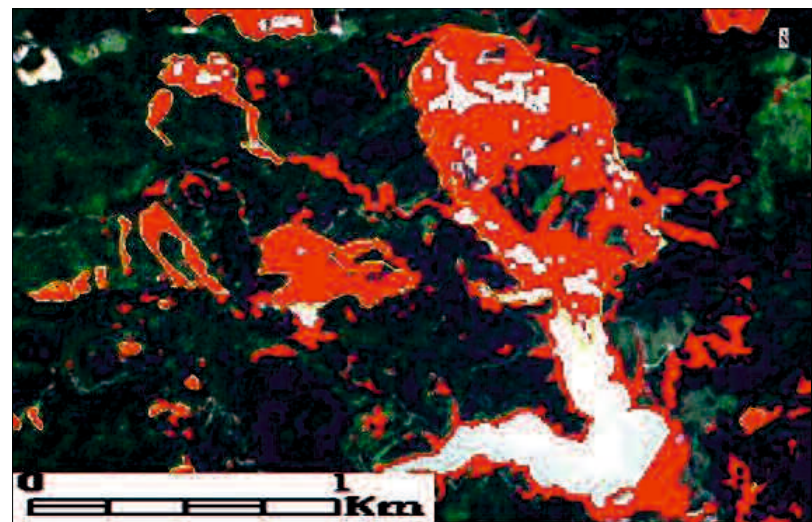


図-2.12 荒砥沢ダム地区における検出結果



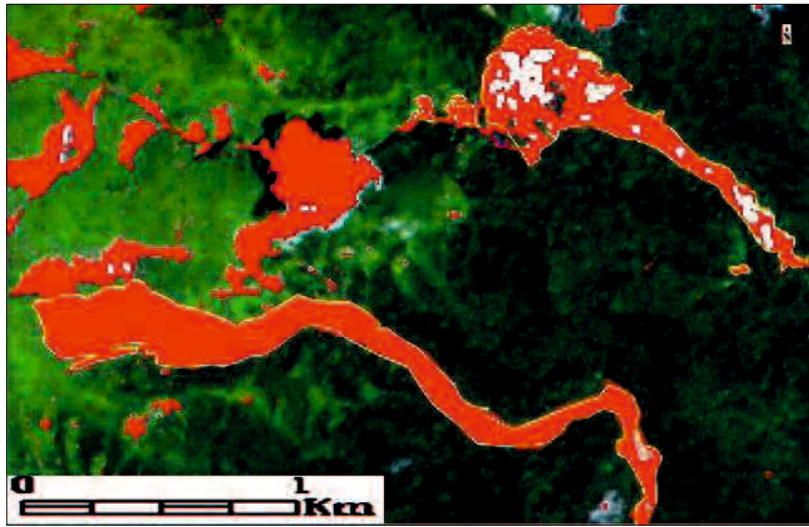


図-2.13 駒ノ湯地区における検出結果

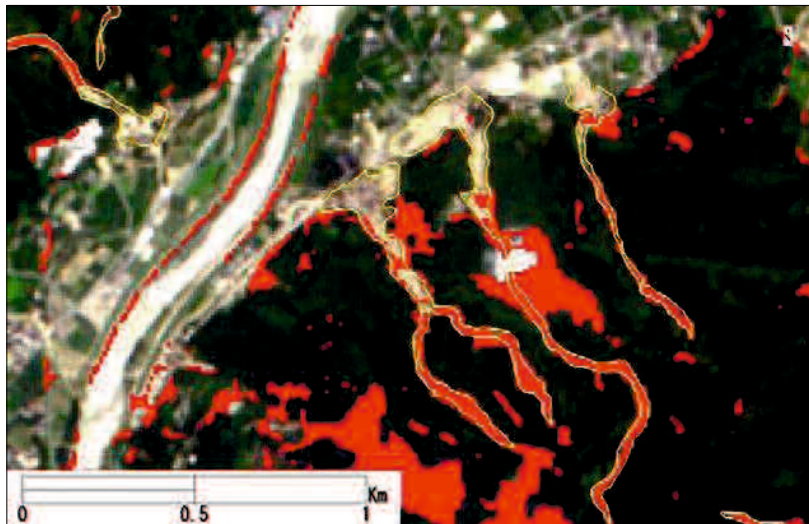


図-2.14 真尾地区における検出結果

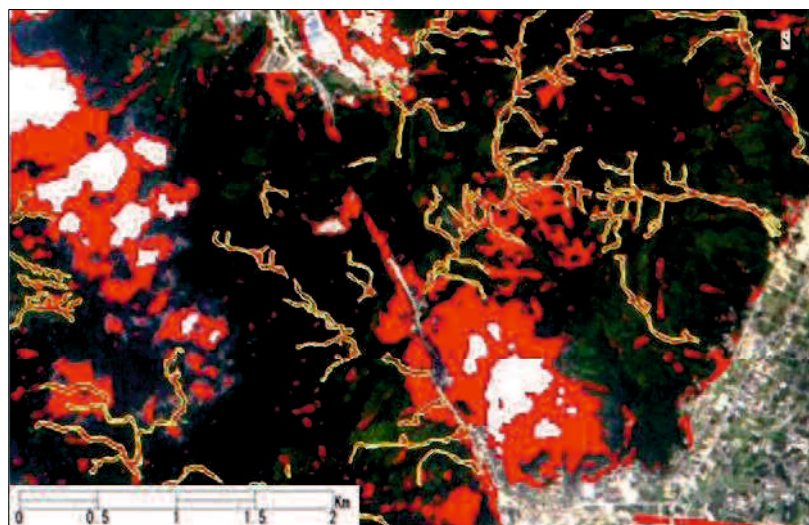


図-2.15 下右田地区における検出結果

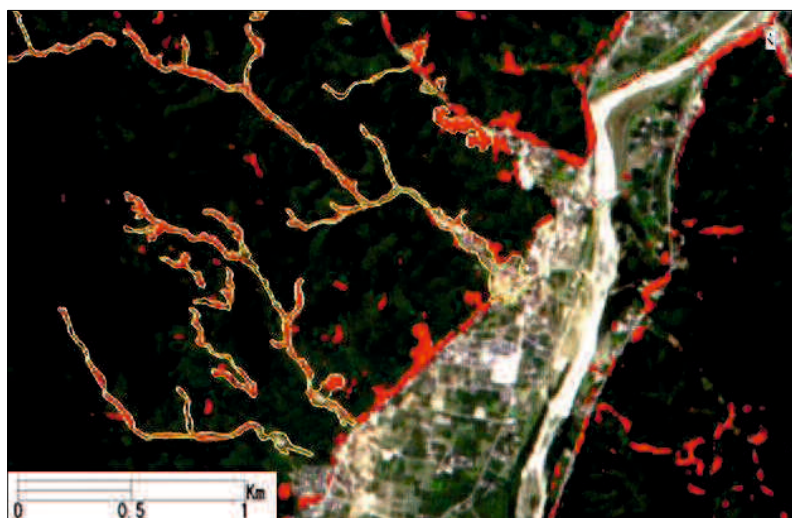


図-2.16 奈美地区における検出結果

セルを教師データとした教師付き分類を行い、分類結果を基に雲の領域をマスク処理した。

7 地区の検出結果を目視判読すると、概ね各地区の土砂移動箇所を検出することができた。

しかし、実際には土砂移動が起きていない場所において誤検出がみられる。例えば、浅布地区の検出結果 (図-2.11) における上下に延びる赤色の筋や真尾地区の検出結果 (図-2.14) における河川に並行する赤色の筋である。これらの場所を GoogleEarth で確認したところ、浅布地区の筋は国道 398 号線、真尾地区の筋は佐波川に並行する道路であることがわかった。

また、真尾地区 (図-2.14) や下右田地区 (図-2.15) における大きな誤検出箇所は、TrueColor 合成画像で確認したところ、薄い雲や雲の影の領域であることがわかった。以上の結果から、実際には道路や薄い雲、雲の影といった領域が土砂移動箇所として誤検出されることがわかった。

ここで、誤検出の原因を調べるため土砂移動域、植生域、水域、雲域、人工物域のピクセル値のヒストグラムを作成した。図-2.17 に真尾地区を例として、土砂移動域、植生域、水域、雲域、人工物域のピクセル値のヒストグラムを示す。ヒストグラムはそれぞれ、赤色が土砂移動域 (Soil)、緑色が植生域 (Vegetation)、青色が水域 (Water)、黒色が雲域 (Cloud)、橙色が人工物域 (Artifact) のものを示す。図のヒストグラムから、道路などの人工物域が示すピクセル値の範囲は広く、土砂移動域や水域が示すピクセル値の範囲と重なっていることがわかる。また、雲域のヒストグラムは人工物域と比べてピクセル値の範囲は狭いが、土砂移動域とほぼ同じ値を示すことがわかる。すなわち、NDVI 画像のピクセル値だけでは土砂域と人工物域や雲域を区別することは難しく、傾斜角を基にしたマスク処理でもこれらの領域の誤検出を除去することは困難だといえる。そのため、これらの領域の誤検出を低減するためには、例えば道路の GIS データの活用や三浦らが提案する日陰領域の除去方法<sup>30)</sup>の活用などが考えられ、この点については今後の研究において更なる検討を行う必要が

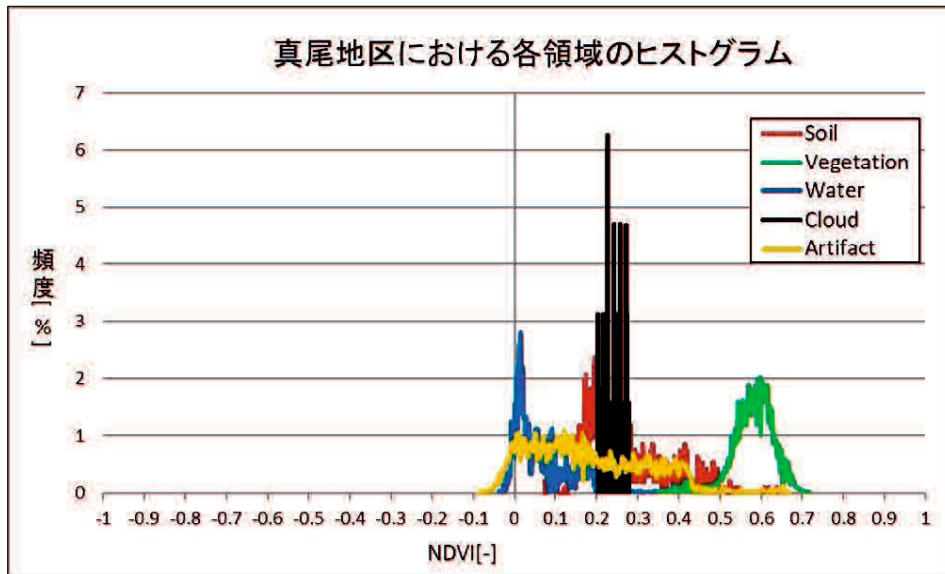


図-2.17 真尾地区における NDVI 画像の各領域のヒストグラム

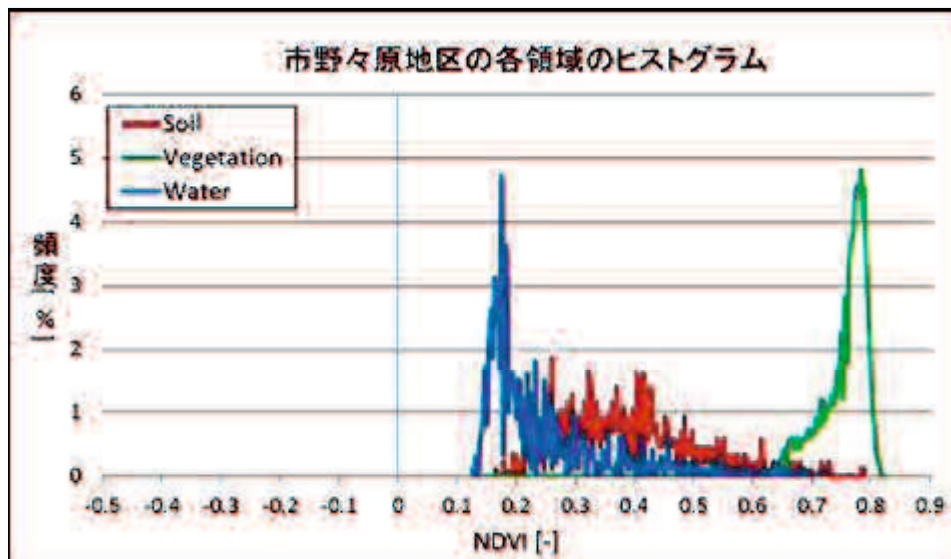


図-2.18 市野々原地区における NDVI 画像の各領域のヒストグラム

ある。

また、図-2.18 に市野々原地区の各領域のヒストグラムを示す。図中のヒストグラムの重なりからわかるように、土砂移動域は概ね 0.2 から 0.7 の範囲の値を示すのに対し、水域は 0.1 から 0.5 の範囲の値を示しており、異なる領域にも関わらず同じ値を示すピクセルが存在する。そのため、閾値を 0.22 とした場合、0.22 より小さい値を示す土砂移動域のピクセルを検出することができない。検出精度を向上させるためには、このような異なる領域にも関わらず同じ値を示すピクセルを減らす必要がある。この点の改善案については、第 3 章で後述する。

次に、各地区における土砂移動箇所を検出結果を表-2.10 と表-2.11 にそれぞれ示す。なお、ここではヒストグラムの交点より求めた閾値により土砂移動箇所を検出できるか否か、すなわち、閾値の妥当性を判断することを目的とするため、実際の土砂移動箇所をどの程度検出できているかを示す検出率のみを示し、誤検出については考慮しない。

表からわかるように、全ての地区において半数以上の土砂移動箇所を検出することに成功しており、ヒストグラムの交点より求めた閾値には妥当性があり、災害発生後の NDVI 画像からでも土砂移動箇所を検出できることを示すことができた。

表-2.10 2008 年岩手・宮城内陸地震における各地区の検出結果

地区	市野々原地区	浅布地区	荒砥沢ダム地区	駒ノ湯地区
検出できた土砂移動箇所数 /実際の土砂移動箇所数	31/31	21/21	23/24	5/5

表-2.11 2009 年中国・九州北部豪雨における各地区の検出結果

地区	真尾地区	下右田地区	奈美地区
検出できた土砂移動箇所数 /実際の土砂移動箇所数	4/6	30/33	11/15

## 2.5.2 広域を対象とした場合の検出結果と考察

表-2.8 と表-2.9 の各地区の閾値を比較すると、2008 年岩手・宮城内陸地震と 2009 年中国・九州北部豪雨の両解析結果において、地区が異なる場合でも閾値は概ね同じであることがわかった。すなわち、1 枚の画像中の土砂移動箇所は場所が異なる場合でも同じ閾値で検出ができる可能性がある。

そこで、各地区の閾値の平均から基準となる閾値を求め、その値を用いて広域の土砂移動箇所の検出を試みる。また、その検出結果の精度評価を併せて行う。

表-2.12 に各地区の閾値の平均から求めた基準となる閾値を示す。また、その値を基に検出した土砂移動箇所の検出結果を図-2.19 と図-2.20 に示す。図は各地区の検出結果と同様に、TrueColor 合成画像の上に検出結果をオーバーレイしたもので、黄色枠で囲んだ領域が災害判読図を基に作成した実際の土砂移動箇所、赤く表示した領域が閾値を基に検出した土砂移動箇所を示す。

広域の検出結果を目視判読すると、概ね土砂移動箇所を検出できたことが確認できる。

しかし、各地区の検出結果と同様に誤検出箇所が多くみられる。例えば、2008 年岩手・宮城内陸地震の検出結果（図-2.19）では、画像の右下隅に誤検出が多くみられる。この場所を GoogleEarth で確認したところ、これらの誤検出の多くはコントラストの低い山の植生域や傾斜角マスクでは除去することができなかった畑であることがわかった。一方、2009 年中国・九州北部豪雨の検出結果（図-2.20）では、雲の周辺に誤検出が多くみられる。



表-2.12 広域の土砂移動箇所を検出する際の基準となる閾値

	2008年岩手・宮城内陸地震	2009年中国・九州北部豪雨
土砂移動箇所	0.15～0.62	0.15～0.50

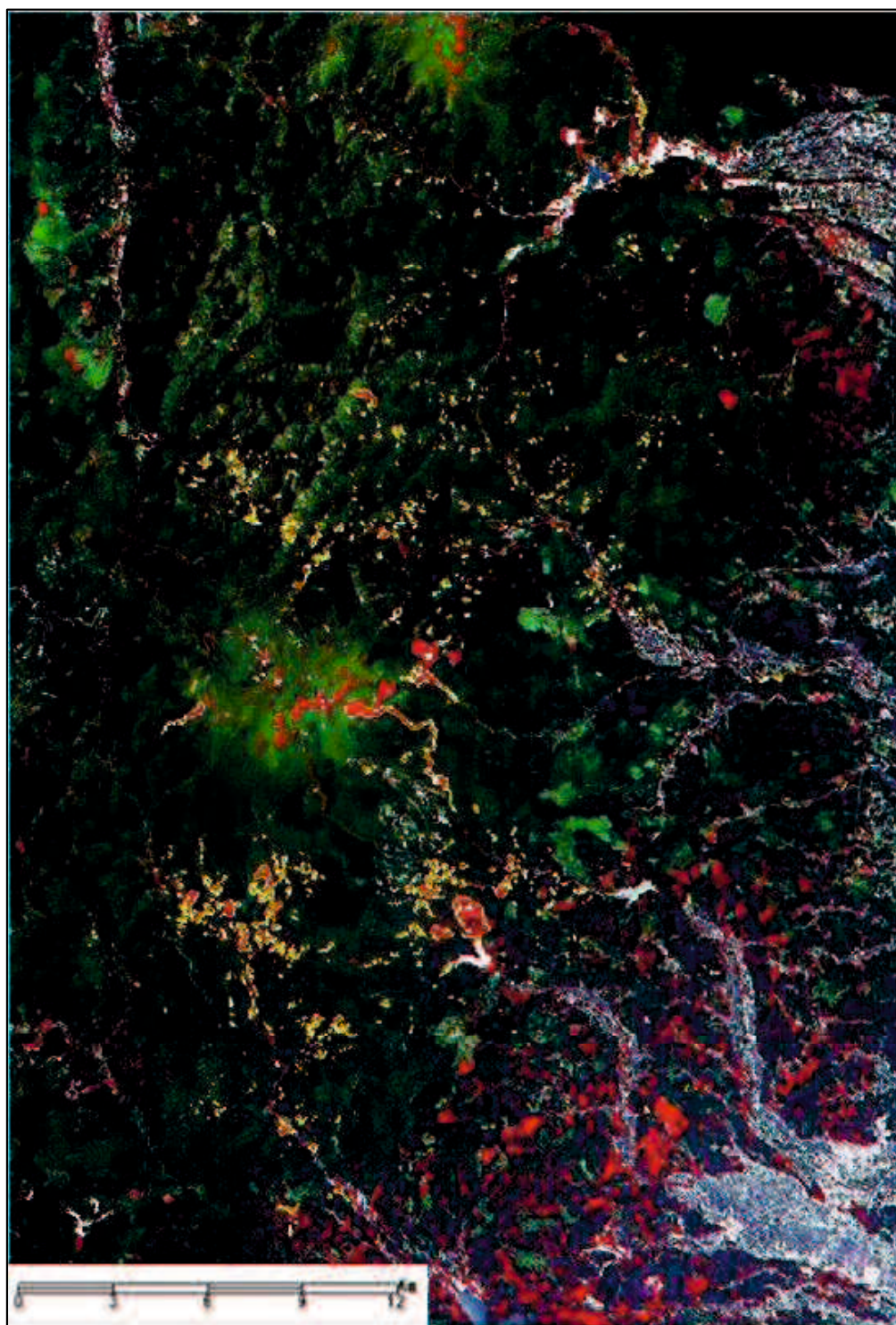


図-2.19 2008年岩手・宮城内陸地震における広域の検出結果

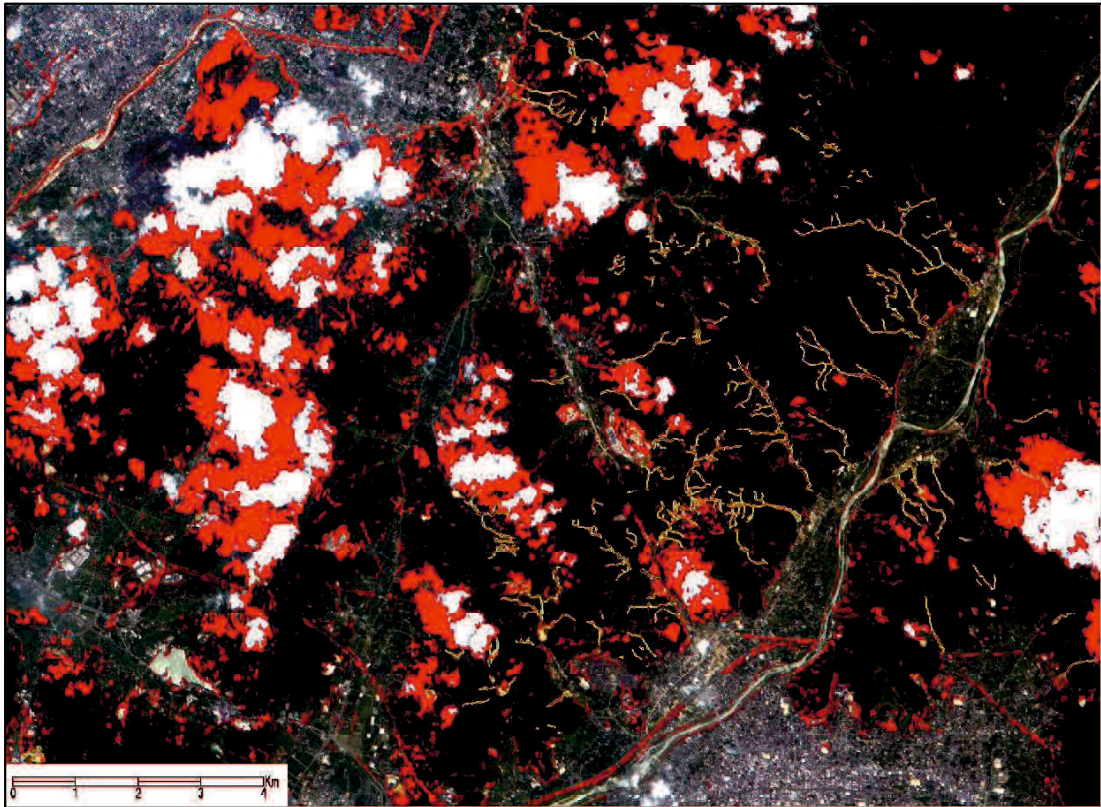


図-2.20 2009年中国・九州北部豪雨における広域の検出結果

TrueColor 合成画像で確認したところ、これらは薄い雲がかかった領域や雲の影となった領域であることがわかった。

次に広域を対象とした場合の検出精度について説明する。ここで、検出精度は、正解データの中から、最大面積、平均面積、最小面積の土砂移動箇所を中心に 50 箇所程度の土砂移動箇所が含まれる範囲を検証エリア 1, 2, 3 として、3 つの検証エリアにおける検出率と正答率の平均値を広域の検出精度として評価した。なお、2009 年中国・九州北部豪雨では、災害判読図の都合上、十分な正解データを準備することができなかったため、図-2.20 に示す範囲全体を検証エリアとした。

表-2.13 から表-2.16 にそれぞれの検出結果と検出精度を示す。

検出精度を算出した結果、2008 年岩手・宮城内陸地震と 2009 年中国・九州北部豪雨の両方の結果から、検出率 90%以上、すなわち、土砂移動箇所の見落としが少ない結果が得られたことがわかった。しかし、正答率は 10%前後と非常に低く、誤検出が非常に多い結果であることもわかった。

三浦らや石出らの既往研究によると、500m<sup>2</sup>以下の土砂移動箇所については検出精度が悪いことが報告されている<sup>7,8)</sup>。そこで、対象とする土砂移動箇所を 500m<sup>2</sup>以上として再度検出結果を評価することとする。

表-2.17 から表-2.20 に 500m<sup>2</sup>以上の土砂移動箇所を対象とした場合の検出結果と検出精

表-2.13 2008年岩手・宮城内陸地震における検証エリア1の検出結果と検出精度

(a) 検出結果

		正解データ	
		<i>Otrue</i> (75)	<i>×true</i>
検出結果	<i>Oresult</i> (751)	74	677
	<i>×result</i>	1	

(b) 検出精度

検出率	99%
未検出率	1%
正答率	10%
誤検出率	90%

表-2.14 2008年岩手・宮城内陸地震における検証エリア2の検出結果と検出精度

(a) 検出結果

		正解データ	
		<i>Otrue</i> (56)	<i>×true</i>
検出結果	<i>Oresult</i> (395)	56	339
	<i>×result</i>	0	

(b) 検出精度

検出率	100%
未検出率	0%
正答率	14%
誤検出率	86%

表-2.15 2008年岩手・宮城内陸地震における検証エリア3の検出結果と検出精度

(a) 検出結果

		正解データ	
		<i>Otrue</i> (69)	<i>×true</i>
検出結果	<i>Oresult</i> (483)	68	415
	<i>×result</i>	1	

(b) 検出精度

検出率	99%
未検出率	1%
正答率	14%
誤検出率	86%

表-2.16 2009年中国・九州北部豪雨における検証エリアの検出結果と検出精度

(a) 検出結果

		正解データ	
		<i>Otrue</i> (111)	<i>×true</i>
検出結果	<i>Oresult</i> (6079)	103	5976
	<i>×result</i>	8	

(b) 検出精度

検出率	93%
未検出率	7%
正答率	2%
誤検出率	98%



表-2.17 500m<sup>2</sup>以上の土砂移動箇所を対象とした場合の

2008年岩手・宮城内陸地震における検証エリア1の検出結果と検出精度

(a) 検出結果

		正解データ	
		<i>Otrue</i> (72)	<i>Xtrue</i>
検出結果	<i>Oresult</i> (287)	71	216
	<i>Xresult</i>	1	

(b) 検出精度

検出率	99%
未検出率	1%
正答率	25%
誤検出率	75%

表-2.18 500m<sup>2</sup>以上の土砂移動箇所を対象とした場合の

2008年岩手・宮城内陸地震における検証エリア2の検出結果と検出精度

(a) 検出結果

		正解データ	
		<i>Otrue</i> (56)	<i>Xtrue</i>
検出結果	<i>Oresult</i> (175)	56	119
	<i>Xresult</i>	0	

(b) 検出精度

検出率	100%
未検出率	0%
正答率	32%
誤検出率	68%

表-2.19 500m<sup>2</sup>以上の土砂移動箇所を対象とした場合の

2008年岩手・宮城内陸地震における検証エリア3の検出結果と検出精度

(a) 検出結果

		正解データ	
		<i>Otrue</i> (65)	<i>Xtrue</i>
検出結果	<i>Oresult</i> (191)	65	126
	<i>Xresult</i>	0	

(b) 検出精度

検出率	100%
未検出率	0%
正答率	34%
誤検出率	66%

表-2.20 500m<sup>2</sup>以上の土砂移動箇所を対象とした場合の

2009年中国・九州北部豪雨における検証エリアの検出結果と検出精度

(a) 検出結果

		正解データ	
		<i>Otrue</i> (109)	<i>Xtrue</i>
検出結果	<i>Oresult</i> (2338)	101	2237
	<i>Xresult</i>	8	

(b) 検出精度

検出率	93%
未検出率	7%
正答率	4%
誤検出率	96%

度を示す。

対象とする土砂移動を 500m<sup>2</sup>以上に限定した場合、2008年岩手・宮城内陸地震における検出率は 99%、正答率は 29%であり、対象を限定することでより誤検出が少なく土砂移動箇所を検出できることがわかった、しかし、2009年中国・九州北部豪雨では、対象を限定する前と後で大きな違いは見られなかった。

ここで、対象を限定する前には検出できた土砂移動箇所が限定後では検出できなかった箇所があり検出率が若干低下した。これは、実際の土砂移動箇所の面積が 500m<sup>2</sup>以上かつ検出結果が 500m<sup>2</sup>未満だった土砂移動箇所にみられ、対象を 500m<sup>2</sup>以上に限定したことで、検出対象ではあるものの検出結果が除外されたことで検出できなかったからである。

一方、対象を限定することで小さな誤検出を除去することができ、正答率が向上した。ここで誤検出について調べた結果、誤検出の 307 箇所（約 6 割）が災害判読図では土砂移動箇所として記載されていないが TrueColor 合成画像や GoogleEarth では土壌が露出しているように見える領域であることがわかった。しかし、ここでは、災害判読図に記載されている土砂域を正解データとするため、これらは誤検出と判断した。また、その他の誤検出としては、79 箇所（約 2 割）が道路など人工物、47 箇所（約 1 割）がコントラストの低い植生域、28 箇所が（約 1 割）が災害前から土壌が露出していた裸地や河川などその他の誤検出であることがわかった。そのため、道路や家屋などの GIS データを活用した場合、約 2 割の誤検出を低減することが可能であり、正答率の向上が期待できる。

以上より、本章で提案する災害発生後の NDVI 画像を用いた検出手法は、500m<sup>2</sup>以上の規模の土砂移動箇所を検出率約 90%、正答率約 30%で検出できるといえよう。

## 2.6 NDVI 画像を用いた 2016 年熊本地震による土砂移動箇所の検出の試み

全節までの結果より、災害発生後の NDVI 画像からでも土砂災害の原因となる土砂移動箇所を検出できることを示せた。

ここでは、検出手法の汎用性について検討するため、2016 年熊本地震<sup>31)</sup>における土砂災害を対象として WorldView-2<sup>32)</sup>データを用いて土砂移動箇所の検出を試みる。

### 2.6.1 解析対象と使用データ

ここでは、2016 年 4 月 14 日と 16 日に発生した熊本県地震を対象に解析を行う。この地震により、熊本県益城町周辺では震度 7 の激しい揺れにみまわれ<sup>31)</sup>、熊本県では約 150 件の土砂災害（土石流・地すべり・がけ崩れ）が発生した。特に阿蘇郡南阿蘇村の立野や河陽といった地区では大規模な土砂災害が発生しており、**図-2.21** は国土地理院が公開している阿蘇大橋周辺で発生した大規模斜面崩壊の様子をとらえた斜め写真<sup>33)</sup>である。**図-2.22** に対象とする地区の位置と範囲を示す。

ここでは、地震発生後に観測された WorldView-2 データを使用する。WorldView-2 とは、DigitalGlobe 社が保有する商業用の地球観測衛星であり、地表面を約 0.5m から約 2m の空間分解能で観測することができる高分解能光学イメージャ（WorldView-110）を有する衛星である<sup>32)</sup>。ここでは、地震発生後に観測されたデータの中から、雲の影響がなるべくないデータとして、地震発生から約半月が経過した 2016 年 5 月 5 日観測のものを使用する。なお、データは可視域から近赤外域の 4Band が含まれたオルソ補正済みのデータである。

また、衛星データ以外のデータとして植生図、地理院地図、災害判読図、DEM のデータを使用する。



図-2.21 阿蘇大橋周辺で発生した大規模斜面崩壊の様子<sup>33)</sup>



図-2.22 2016年熊本地震における解析対象地区の位置と範囲

## 2.6.2 熊本県南阿蘇村立野地区を対象とした場合の検出結果と考察

図-2.23 に南阿蘇村立野地区における土砂移動域・植生域・水域のヒストグラムを示す。ここでは、ヒストグラムの交点より、0.22~0.33を閾値とする。

閾値を基に検出した南阿蘇村立野地区の検出結果を図-2.24 に、検出精度を表-2.21 にそれぞれ示す。なお、ここでは、2.5.2の結果を基に500m<sup>2</sup>以上の土砂移動箇所を対象とした場合の結果のみ示す。

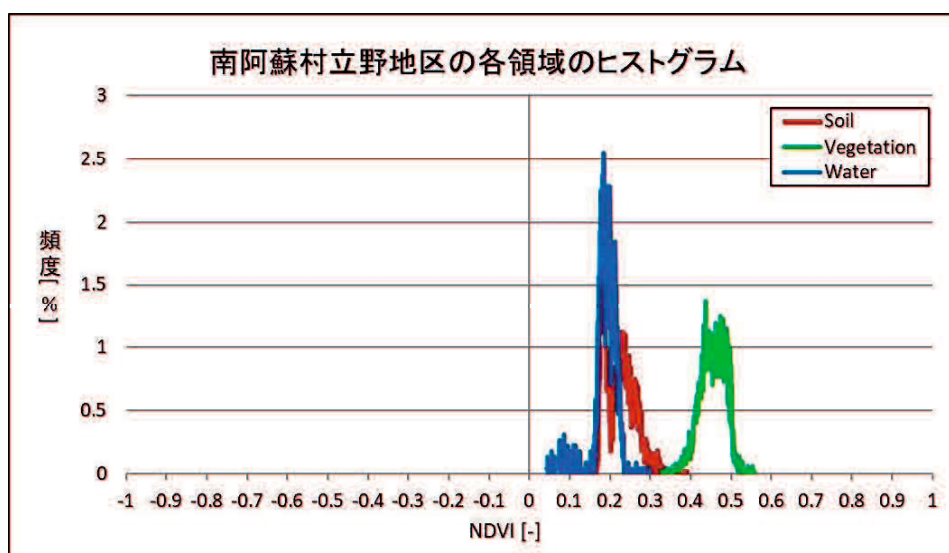


図-2.23 南阿蘇村立野地区における各領域のヒストグラム



図-2.24 南阿蘇村立野地区における検出結果

表-2.21 南阿蘇村立野地区における検出結果と検出精度

(a) 検出結果

		正解データ	
		<i>Otrue</i> (121)	<i>Xtrue</i>
検出結果	<i>Oresult</i> (602)	110	492
	<i>Xresult</i>	11	

(b) 検出精度

検出率	91%
未検出率	9%
正答率	18%
誤検出率	82%

ここでは、検出率 91%で土砂移動箇所を検出できており、土砂移動箇所を見落としが少なく検出できた。しかし、例えば画像中央に位置する最も大きな阿蘇大橋周辺の土砂移動箇所を検出することができなかった。これは 2.5.1 で前述したように、異なる領域にもかかわらず同じ値を示すピクセルが原因として考えられる。検出できなかった阿蘇大橋周辺の土砂移動域のピクセル値を調べた結果、この土砂域は 0.15~0.24 の範囲の値を示しており、土砂移動域の大部分が今回設定した閾値 0.22 より小さい値を示すピクセルであったため検出することができなかったことがわかった。

また、検出結果の正答率は 18%と低い結果であった。これは誤検出が多かったためであ



る。例えば、画像中央左や右下隅、山の植生域に誤検出がみられる。GoogleEarth でこれらの場所を確認したところ、画像中央左や右下隅に点在する赤色の領域の内、大きいものは工事により土壌が露出している裸地であり、小さいものは作物が育成されていない畑、赤色の筋は道路であることがわかった。このような誤検出を低減するためには、田畑の耕作地や道路の GIS データの活用が有効であり、GIS データを活用することで検出精度を向上させることが可能である。一方、山の植生域に見られる赤色の領域は、TrueColor 合成画像で確認したところ、周りの植生域と比べ樹木の密度が低く地表面の土壌が上空から確認できる場所であることがわかった。これらの誤検出は、中分解能衛星 ALOS/AVNIR-2 画像を用いた場合には見られず、高分解能衛星画像を用いた場合にのみ検出された。そのため、高分解能衛星画像を用いる場合はこのような誤検出があることに留意する必要がある。なお、これらが土砂移動箇所であるか否かは GoogleEarth や TrueColor 合成画像では判断することができなかったため、ここでは、災害判読図に土砂移動箇所として記載されていないという理由から、これらを誤検出と判断した。

以上より、本章で提案する災害発生後の NDVI 画像を用いた検出手法は、2016 年熊本地震を対象として WorldView-2 データを用いた場合でも、500m<sup>2</sup>以上の規模の土砂移動箇所を検出率約 90%、正答率約 20%で検出できることを示すことができた。

## 2.7 結語

本章では、災害発生後の光学センサ画像から土砂移動箇所を検出する手法として、2008 年岩手・宮城内陸地震と 2009 年中国・九州北部豪雨において発生した土砂災害を対象として、災害発生後に観測された ALOS/AVNIR-2 データの NDVI 画像を用いた検出手法について検討を行った。また、検出手法の汎用性について検討するため、2016 年熊本地震を対象として WorldView-2 データを用いた検出も試みた。

その結果、以下に示す知見を得ることができた。

①2008 年岩手・宮城内陸地震および 2009 年中国・九州北部豪雨における各地区を対象とした検出結果から、災害発生後の NDVI 画像における土砂移動域・植生域・水域のヒストグラムの交点を閾値とすることで、各地区の土砂移動箇所を精度良く検出できることを示すことができた。すなわち、災害発生後のみの NDVI 画像からでも土砂移動箇所を検出でき、その結果に道路や家屋などの GIS データを併用することで土砂災害の発生箇所を特定できることを示すことができた。また、各地区の閾値は地区が異なる場合でも概ね同じであることがわかった。

②広域を対象とした検出結果から、2008 年岩手・宮城内陸地震では閾値を 0.15~0.62、2009 年中国・九州北部豪雨では閾値を 0.15~0.50 とすることで、災害発生後の NDVI 画像から同じ閾値で広域の各土砂移動箇所を検出できることを示すことができた。また、

500m<sup>2</sup>以上の規模の土砂移動箇所を対象とした場合、2008年岩手・宮城内陸地震では土砂移動箇所を検出率99%正答率29%、2009年中国・九州北部豪雨では検出率93%正答率4%の検出精度で検出でき、誤検出は多いものの見落としが少なく検出できることを示すことができた。しかし、傾斜角マスクで除去できなかった傾斜角が10度以上の領域にある道路や畑、また雲や雲の影といった場所において誤検出が多い。そのためこれらの誤検出を低減するためには道路や畑などのGISデータを活用した手法について検討を行う必要がある。

③2016年熊本地震を対象とした検出結果から、WorldView-2データを用いた場合でも、500m<sup>2</sup>以上の規模の土砂移動箇所を対象とした場合、検出率91%正答率18%の検出精度で土砂移動箇所を検出できることを示すことができた。しかし、WorldView-2など高分解能衛星画像を使用した場合、樹木の密度が低く地表面の土壌が上空から確認できる場所などを誤検出してしまう場合があり、このことについて留意する必要があることがわかった。

## 参考文献

- 1) 筒井健, 宮崎早苗, 六川修一, 中川英朗: 高分解能衛星画像からの高精度自動標高変化抽出による 2004 年新潟県中越地震に伴う斜面災害規模の推定, 応用地質, 第 46 巻, 第 3 号, pp.125-137, 2005.
- 2) Kimura, H. and Y. Yamaguchi: Detection of Landslide Areas Using Satellite Radar Interferometry, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.66, No.3, pp.337-343, 2000.
- 3) Saraf, A. K.: IRS-1C-PAN Depicts Chamoli Earthquake Induced Landslides in Garhwal Himalayas, India, International Journal of Remote Sensing, Vol.21, No.12, pp.2345-2352, 2000.
- 4) Yamaguchi, Y., S. Tanaka, T. Odajima, T. Kamai and T. Tsuchida: Detection of a Landslide Movement as Geometric Misregistration in Image Matching of SPOT HRV Data of Two Different Dates, International Journal of Remote Sensing, Vol.24, No.18, pp.3523-3534, 2003.
- 5) 水野正樹, 林 真一郎, 清水孝一, 小山内信智: 衛星リモートセンシング技術の土砂災害への応用, 土木技術資料, 第 53 巻, 第 1 号, pp.16-19, 2011.
- 6) Tucker, C. J. : Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, Remote Sensing of Environment, Vol.8, No.2, pp.127-150, 1979.
- 7) 石出貴大, 山崎文雄: ALOS/AVNIR-2 画像を用いた 2008 年岩手・宮城内陸地震における斜面崩壊の検出, 日本地震工学学会論文集, 第 10 巻, 第 3 号, pp.12-24, 2010.
- 8) 三浦弘之, 翠川三郎: 高分解能衛星画像と数値標高モデルを用いた 2004 年新潟県中越地震での斜面崩壊地の検出, 日本地震工学学会論文集, 第 7 巻, 第 5 号, pp.1-14, 2007.
- 9) 小畑健太, 岩男弘毅: 平成 28 年熊本地震に起因する斜面崩壊と ASTER データにおける NDVI 変化の関係, 日本リモートセンシング学会誌, 第 36 巻, 第 4 号, pp.417-420, 2016.
- 10) 内閣府防災担当: 平成 20 年岩手・宮城内陸地震フォローアップ調査報告書, [http://www.bousai.go.jp/kaigirep/houkokusho/hukkousesaku/pdf/fukkou\\_chousa201003.pdf](http://www.bousai.go.jp/kaigirep/houkokusho/hukkousesaku/pdf/fukkou_chousa201003.pdf), 2010.
- 11) 内閣府防災担当: 平成 21 年 7 月中国・九州北部豪雨による被害状況等について, <http://www.bousai.go.jp/updates/090721ooame/pdf/100326higaizyoukyou024.pdf>, 2010.
- 12) 宇宙航空研究開発機構第一宇宙技術部門: 人工衛星プロジェクトだいち (ALOS) , <http://www.satnavi.jaxa.jp/project/alos/gaiyo.html>.
- 13) 内閣府防災担当: 平成 20 年(2008 年)岩手・宮城内陸地震について 第 34 報, <http://www.bousai.go.jp/updates/jishin/iwate/pdf/2008-iwate-ca0-034.pdf>.
- 14) 国土技術政策総合研究所機器管理技術研究センター砂防研究室: 平成 20 年岩手・宮城内陸地震報告 (土砂災害) , [https://www.pwri.go.jp/jpn/research/disaster/iwate-miyagi/03\\_dosekiryu.pdf#search=%27%E5%B2%A9%E6%89%8B%E3%83%BB%E5%AE%AE%E5%9F%8E%E5%86%85%E9%99%B8%E5%9C%B0%E9%9C%87+%E5%9C%9F%E7%A0%82%E7%81%BD%E5%AE%B3%27](https://www.pwri.go.jp/jpn/research/disaster/iwate-miyagi/03_dosekiryu.pdf#search=%27%E5%B2%A9%E6%89%8B%E3%83%BB%E5%AE%AE%E5%9F%8E%E5%86%85%E9%99%B8%E5%9C%B0%E9%9C%87+%E5%9C%9F%E7%A0%82%E7%81%BD%E5%AE%B3%27).
- 15) アジア航測株式会社: 「平成 20 年(2008 年)岩手・宮城内陸地震」災害状況 (2008 年 6 月 14 日) , <http://www.ajiko.co.jp/article/detail/ID4TC295YV5/>.
- 16) アジア航測株式会社: 「平成 21 年 7 月中国・九州北部豪雨」災害状況 (2009 年 7 月) , [https://www.ajiko.co.jp/news\\_detail/?id=12333](https://www.ajiko.co.jp/news_detail/?id=12333).
- 17) 宇宙航空研究開発機構第一宇宙技術部門: 人工衛星プロジェクト先進光学衛星 (ALOS-3) , <http://www.satnavi.jaxa.jp/project/senshin/>.
- 18) 環境省自然環境局: 1/2.5 万現存植生図, <http://www.vegetation.biodic.go.jp/>.
- 19) 国土交通省国土地理院: 地理院地図, [https://maps.gsi.go.jp/#12/32.783522/131.139679/&ls=\\_ort&disp=1&lcd=\\_ort&vs=c1j0h0k0l0u0t0z0r0s0f1&d=vl](https://maps.gsi.go.jp/#12/32.783522/131.139679/&ls=_ort&disp=1&lcd=_ort&vs=c1j0h0k0l0u0t0z0r0s0f1&d=vl).
- 20) 国土交通省国土地理院: 地理院地図で得られる値等について, <https://maps.gsi.go.jp/help/how-touse.html>.
- 21) アジア航測株式会社: <http://www.ajiko.co.jp/article/detail/ID4TC295YV5/>.
- 22) 国際航業株式会社: [http://www.kkc.co.jp/service/bousai/csr/disaster/200707\\_nigata/Indexhtml](http://www.kkc.co.jp/service/bousai/csr/disaster/200707_nigata/Indexhtml).
- 23) 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

- の開発, 写真測量とリモートセンシング, 第 43 巻, 第 6 号, pp.7-19, 2004.
- 24) Gao, B.C., : NDWI-A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space, Remote Sensing Environment, Vol.58, No.3, pp.257-266, 1996.
  - 25) Lathrop, R. G., Lillesand, T. M. and Yandell, B. S. : Testing the utility of simple multi-data thematic mapper calibration algorithms for monitoring turbid inland waters, Int. J. Remote Sens., Vol.12, No.10, pp.2045-2063, 1991.
  - 26) 江口毅, 三浦房紀 : 衛星リモートセンシングを用いた斜面崩壊域早期発見手法の検討, 第 14 回日本地震工学シンポジウム, OS12-Sat-AM-4, 2014.
  - 27) Eguchi, T. and Miura, F. : A study on detecting the locations of slope failure due to earthquakes and heavy rains by using satellite remote sensing, 8th Asian Rock Mechanics Symposium, PO-58, 2014.
  - 28) 江口毅, 三浦房紀, 栗田昌志 : 衛星リモートセンシングを用いた豪雨による土砂災害域のスペクトル特性に関する検討, 土木学会中国支部平成 26 年度研究発表会, IV-22, 2013.
  - 29) 中村浩之, 上屋智, 井上公夫, 石川芳治(編) : 地震砂防, 古今書院, 2000.
  - 30) 三浦弘之, 翠川三郎 : 建物 GIS データの更新を目的とした高分解能衛星画像からの建物自動検出手法, 地域安全学会論文集, 第 5 巻, pp.37-44, 2003.
  - 31) 国土交通省 : 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震について (第 56 報) , <http://www.mlit.go.jp/common/001257342.pdf>.
  - 32) 一般財団法人リモート・センシング技術センター : <https://www.restec.or.jp/satellite/worldview-2>.
  - 33) 国土交通省国土地理院 : 平成 28 年熊本地震に関する情報, [http://www.gsi.go.jp/BOU\\_SAI/H27-kumamoto-earthquake-index.html](http://www.gsi.go.jp/BOU_SAI/H27-kumamoto-earthquake-index.html).

### 3 災害発生後の NBR 画像を用いた土砂災害検出手法

#### 3.1 緒言

第2章では、災害発生後の NDVI<sup>1)</sup>画像における土砂移動域（斜面崩壊などにより土砂が移動した領域）・植生域・水域のヒストグラムの交点を閾値とすることで、災害発生後の NDVI 画像から土砂移動箇所を検出できることを示した<sup>2~4)</sup>。また、500m<sup>2</sup>以上の規模の土砂移動箇所を対象とした場合、検出率約 90%、正答率約 30%の精度で土砂移動箇所を検出できることを示した。

しかし、NDVI 画像には異なる領域にも関わらず同じ値を示すピクセルが存在するため、未検出や誤検出となる土砂移動箇所があった。

そこで、本章では土砂移動域・植生域・水域がそれぞれ異なる値を示す指標を新たに考案し、このようにして作成した画像を用いて土砂移動箇所の検出を試みる。具体的には、NIR, Blue, Redの3Bandを組み合わせたNBR画像を用いて、2008年岩手・宮城内陸地震<sup>5)</sup>と2009年中国・九州北部豪雨<sup>6)</sup>によって発生した土砂災害を対象に検出を試みる。

#### 3.2 解析対象と使用データ

本章では、第2章と同様に2008年岩手・宮城内陸地震と2009年中国・九州北部豪雨によって発生した土砂災害を対象として、ALOS/AVNIR-2<sup>7)</sup>データを用いて解析を行う。また、衛星データ以外のデータとして、自然環境局生物多様性センターによって取りまとめられた植生調査結果<sup>8)</sup>（以下、植生図と呼ぶ）、国土地理院が公開している地理院地図<sup>9)</sup>および数値標高モデル（Digital Elevation Model : DEM）<sup>10)</sup>、アジア航測株式会社や国際航業株式会社によって作成された崩壊・地すべり等判読図<sup>11)</sup>や垂直写真判読図<sup>12)</sup>（以下、災害判読図と呼ぶ）を使用する。本章で使用するデータを表-3.1 と表-3.2 に再掲する。したがって、ここでは対象とする災害事例および各データの詳細については説明を割愛する。

表-3.1 使用する ALOS/AVNIR-2 データ

災害事例	データの観測日	分解能	ポインティング角	処理レベル
2008年岩手・宮城内陸地震	2008年7月2日 (発災約1ヶ月後)	10m	-2.5	1B2
2009年中国・九州北部豪雨	2009年7月23日 (発災直後)	10m	17.0	1B2

表-3.2 その他データ

データ	入手元	使用用途
植生調査結果（植生図） <sup>8)</sup>	環境省自然環境局生物多様性センター	植生域の特定
地理院地図 <sup>9)</sup>	国土交通省国土地理院	水域・土砂移動域の特定
数値標高モデル（DEM） <sup>10)</sup>		都市域のマスク処理
崩壊・地すべり判読図 <sup>11)</sup> 垂直写真判読図（災害判読図） <sup>12)</sup>	アジア航測株式会社、 国際航業株式会社	土砂移動域の特定

### 3.3 新しい指標 NBR の検討

#### 3.3.1 新しい指標に用いる Band の検討

本章で使用する ALOS/AVNIR-2 には可視域から近赤外域を観測するための 4 つの Band がある。表-3.3 に ALOS/AVNIR-2 の Band の諸元を示す<sup>7)</sup>。また、図-3.1 に物質の分光反射特性のグラフを示す<sup>13)</sup>。グラフは横軸が波長、縦軸が反射の強さを表す。

植生の活性度を示す NDVI は、植生の反射ピークである近赤外域と可視域（赤）の反射率の差をその和で割ることで算出する<sup>7)</sup>。しかし、2.5 で前述したように、NDVI 画像では、異なる領域にも関わらず同じ値を示すピクセルが存在し、それらが土砂移動箇所の検出精度に悪影響をおよぼすことがわかった。

そこで本章では、代表的な土地被覆である土砂移動域・植生域・水域の 3 種類の領域が概ね異なる値を示す新しい指標を考案する。

図-3.2 は図-3.1 を基に作成した、土、植生、水の相対的な反射強度と Band の関係を示したものである。ここでは最も強い反射強度を 10 としている。そして、各 Band における土（土砂移動域と考える）、植生（植生域と考える）、水（水域と考える）の相対的な反射強度をまとめたものが表-3.4 である。

表の数値からわかるように、土砂移動域と水域は波長が短い Band ほど反射強度が強いことがわかる。また、植生域については Band4 の反射強度が非常に強いがその他の Band についてはほぼ同じ反射強度であることがわかる。

表-3.3 ALOS/AVNIR-2 の諸元<sup>7)</sup>

Band	波長帯
1	0.42～0.50 $\mu$ m
2	0.52～0.60 $\mu$ m
3	0.61～0.69 $\mu$ m
4	0.76～0.89 $\mu$ m

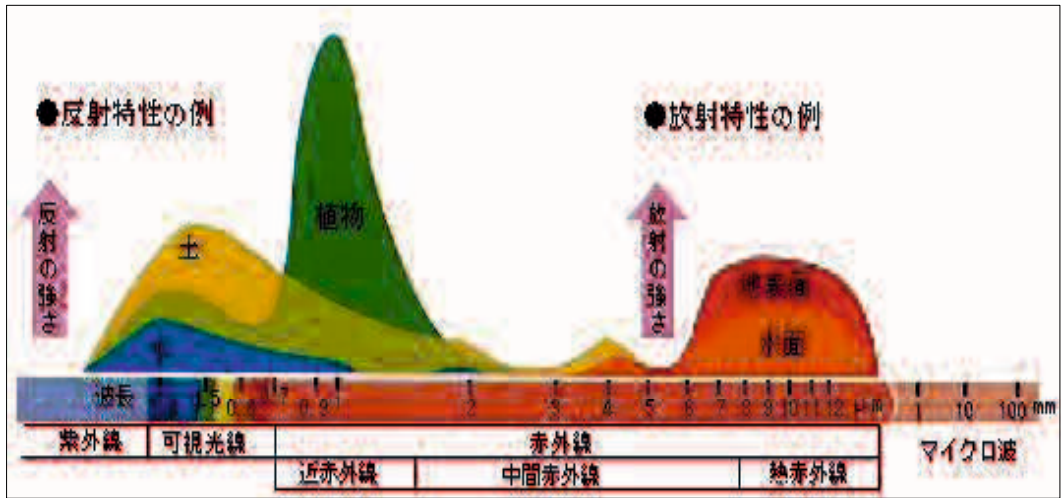


図-3.1 物質の反射・放射特性<sup>13)</sup>

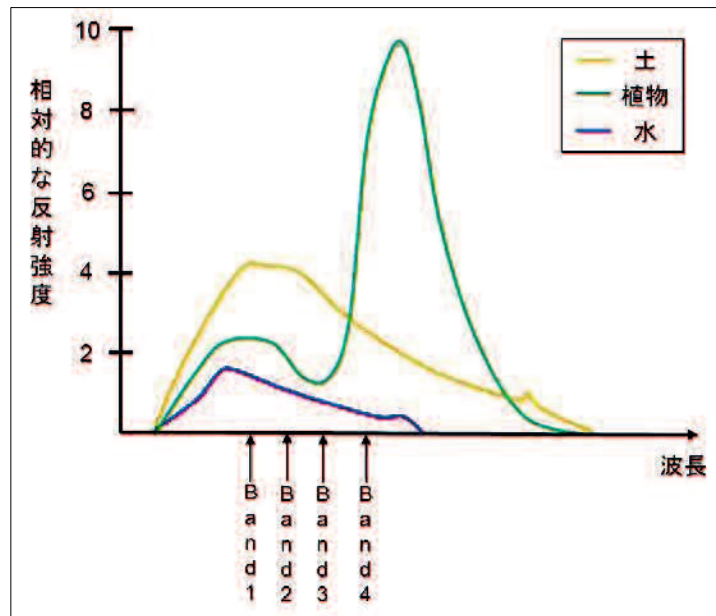


図-3.2 相対的な反射強度と Band の関係

表-3.4 土砂移動域・植生域・水域における各 Band の相対的な反射強度

	土地被覆		
	土砂移動域	植生域	水域
Band1 (青)	5	2.5	2
Band2 (緑)	4.5	2	1.5
Band3 (赤)	3	1.5	1
Band4 (近赤外)	2.5	10	0.5

また、NDVI のようにある土地被覆を定量的に表す指標の算出には、その土地被覆における反射ピーク、すなわち反射強度が最大となる Band と最小となる Band が用いられる<sup>14)</sup>。そのため、表の数値を比較すると、土砂移動域には Band1 と Band4、植生域には Band4 と Band3、水域には Band1 と Band4 が有効であると考えられる。

以上のことから、本章では新指標の算出に Band1, 3, 4 の 3Band を用いることとする。

### 3.3.2 新しい指標の提示

土砂移動域・植生域・水域の 3 種類の領域が概ね異なる値を示す Band1, 3, 4 の 3Band の組み合わせ方について検討を行う。

NDVI では Band4 から Band1 の値を引くことにより植生域が示す値が土砂移動域や水域と異なる値となるため、植生域の検出に有効となる。しかし、表-3.4 の値を例として Band4 から Band1 の値を引くと、植生域は 8.5、土砂移動域と水域は -0.5 となり、土砂移動域と水域が同じ値となり区別することができない。

そこで、土砂移動域・植生域・水域が示す値が最も異なるような Band1, 3, 4 の 3Band の組み合わせを表-3.4 の値を参考に検討した結果、Band4 の値から Band1 と Band3 の値を引くことで土砂移動域は -5.5、植生域は 6、水域は -2.5 となり、3 種類の領域が最も異なる値を示すことがわかった。

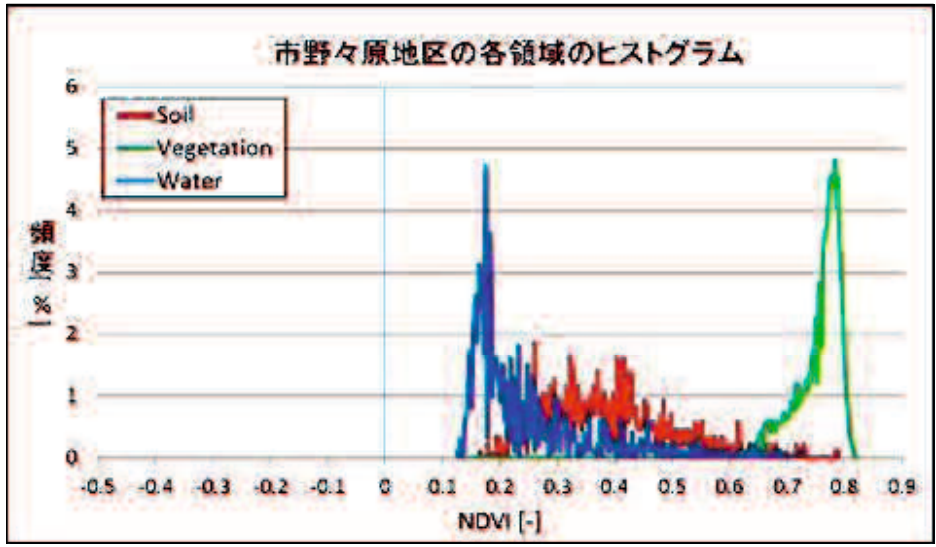
以上の検討結果から、本研究では *Band1, 3, 4* を用いた式(3.1)で表される新しい正規化指標を提案する。本研究では、各 Band の頭文字をとってこの新指標を *NBR* (Near-Infrared, Blue, Red)<sup>15)</sup> と呼ぶこととする。

$$NBR = \frac{(Band4 - Band1 - Band3)}{(Band4 + Band1 + Band3)} \quad (3.1)$$

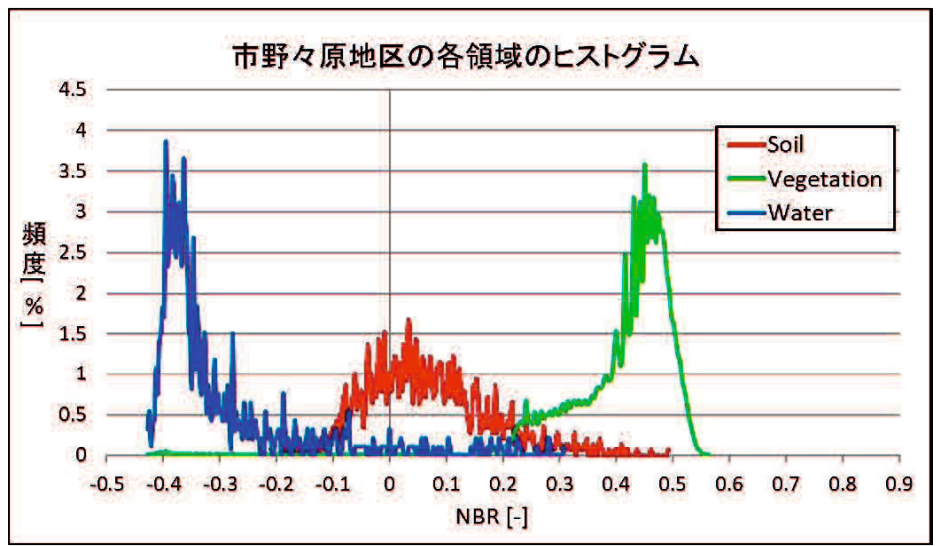
ここで、想定したとおり *NBR* 画像における土砂移動域、植生域、水域がそれぞれ異なる値を示すか否かを確認するため、NDVI 画像と *NBR* 画像における各領域のヒストグラムを比較する。図-3.3(a)に NDVI 画像のヒストグラムと(b)に *NBR* 画像のヒストグラムの例を比較して示す。

両図からわかるように、NDVI 画像と *NBR* 画像の両画像において各領域は植生域、土砂移動域、水域の順で大きい値を示すことがわかる。また、NDVI 画像では土砂移動域と水域のヒストグラムが重なっており、異なる領域にも関わらず同じ値を示すピクセルが多く存在するのに対して、*NBR* 画像では各領域がそれぞれのヒストグラムが比較的良く分離されていることがわかる。よって、閾値を用いた土砂移動箇所の検出では、*NBR* 画像を用いる場合の方が、NDVI 画像を用いる場合と比べて誤抽出や未検出が少ないことが期待できる。





(a)NDVI 画像



(b)NBR画像

図-3.3 NDVI画像とNBR画像におけるヒストグラムの比較

### 3.4 解析手順

図-3.4 に災害発生後の NBR 画像を用いた土砂移動箇所の検出とその検出結果の評価までの流れを示す。この流れは、図-2.5 に示した流れの中で NDVI を NBR に置き換えただけであり、あとは全く同じである。

したがって、手順は、NDVI に代わって式(2.3)を置き換えた式(3.2)を用いるところだけが異なり、あとは 2.4 で説明した解析手順と同様である。

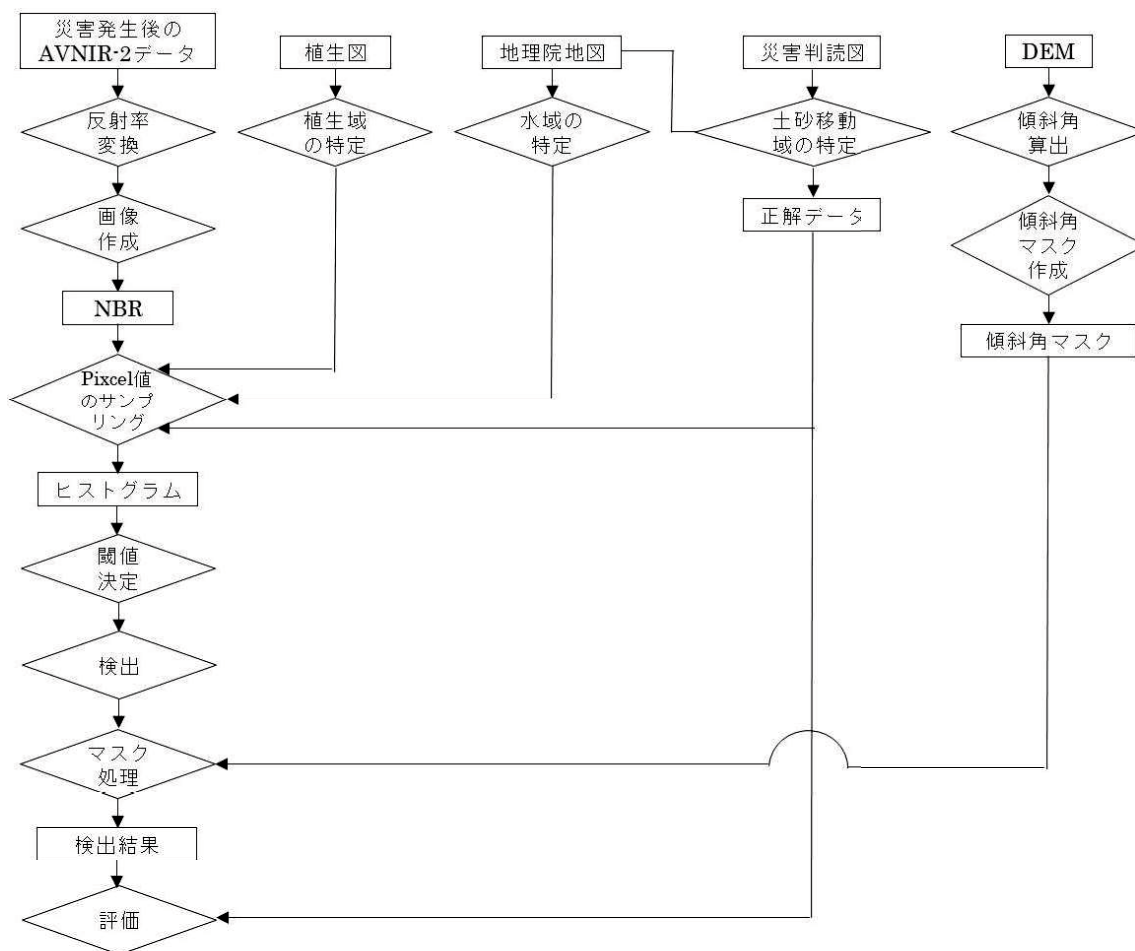


図-3.4 NBR画像を用いた土砂移動箇所の検出と精度評価までの流れ

$$NBR = \frac{( NIR - Blue - Red )}{( NIR + Blue + Red )} \quad (3.2)$$

ここに、*NIR*は近赤外線の反射率、*Blue*は可視光線（青）の反射率、*Red*は可視光線（赤）の反射率である。

*NBR*は*NDVI*と比べて比較的良く分類されるという特徴がある。また、*NBR*では植生域、土砂移動域、水域の順に大きい値を示す。

ここでは、*NDVI*画像と*NBR*画像を用いた場合の検出精度を比較することで、それぞれの検出手法の特徴について整理する。

### 3.5 検出結果と考察

#### 3.5.1 各地区を対象とした場合の検出結果と考察

はじめに、2008年岩手・宮城内陸地震と2009年中国・九州北部豪雨において特に土砂災害による被害が大きかった地区の土砂移動箇所の検出結果について説明する。解析対象とした地区は、2008年岩手・宮城内陸地震では河道閉塞が形成されるなどした4地区（市野々原地区、浅布地区、荒砥沢ダム地区、駒ノ湯地区）、2009年中国・九州北部豪雨では道路の寸断や人的被害があった3地区（真尾地区、下右田地区、奈美地区）とした。それぞれの解析対象地区の一覧を表-3.5と表-3.6に示す。また、それぞれの対象地区の位置と範囲

表-3.5 2008年岩手・宮城内陸地震における解析対象地区

番号	解析対象地区	略称
①	岩手県一関市市野々原地区	市野々原地区
②	宮城県栗原市浅布地区	浅布地区
③	宮城県栗原市荒砥沢ダム地区	荒砥沢ダム地区
④	宮城県栗原市駒ノ湯地区	駒ノ湯地区

表-3.6 2009年中国・九州北部豪雨における解析対象地区

番号	解析対象地区	略称
①	山口県防府市真尾地区	真尾区
②	山口県防府市下右田地区	下右田地区
③	山口県防府市奈美地区	奈美地区



図-3.5 2008年岩手・宮城内陸地震における解析対象地区の位置



図-3.6 2009年中国・九州北部豪雨における解析対象地区の位置

を図-3.5 と図-3.6 に示す。なお、各地区の範囲はその地区において最も大きい土砂移動箇所を中心として、複数の土砂移動箇所が含まれるように約 2km × 約 2.5km 程度の範囲とした。

次に、地区毎に求めた土砂移動箇所を検出するための閾値を表-3.7 と表-3.8 に示す。なお、対象地区において、河川や湖沼などの水域が存在しない場合や水域の面積が狭いなどの理由により確実に水域である領域の値をサンプリングすることができない場合、土砂移動箇所を検出するための下限の閾値をヒストグラムの交点から求めることができない。そこで、ここでは NDVI 画像を用いる場合と同様に、浅布地区、駒ノ湯地区、下右田地区における下限の閾値を一律で -1.0 とした。

図-3.7 から図-3.10 に 2008 年岩手・宮城内陸地震、図-3.11 から図-3.13 に 2009 年中国・九州北部豪雨における各地区の土砂移動箇所の検出結果を示す。各画像は TrueColor 合成画像の上に検出結果をオーバーレイしたもので、黄色枠で囲んだ領域が災害判読図を基に作成した実際の土砂移動箇所、赤く表示した領域が閾値を基に検出した土砂移動箇所を示す。

また、2009 年中国・九州北部豪雨における 3 地区では、厚い雲によって地表面の様子を確認することができない場所が多くみられた。そこで、確実に雲である領域の約 5,000 ピクセルを教師データとした教師付き分類を行い、分類結果を基に雲の領域をマスク処理した。

7 地区の検出結果を目視判読すると、概ね各地区の土砂移動箇所を検出することができた。しかし、NDVI 画像を用いた場合と同様に、道路やコントラストの低い植生域、薄い雲や雲の影となっている場所を土砂移動箇所として誤検出した。



表-3.7 2008年岩手・宮城内陸地震における土砂移動箇所を検出するための各地区の閾値

領域\地区	市野々原地区	浅布地区	荒砥沢ダム地区	駒ノ湯地区
土砂移動箇所	-0.12~0.22	-1.0~0.18	-0.20~0.13	-1.0~0.20

表-3.8 2009年中国・九州北部豪雨における土砂移動箇所を検出するための各地区の閾値

領域\地区	真尾地区	下右田地区	奈美地区
土砂移動箇所	-0.24~0.03	-1.0~0.03	-0.18~0.03

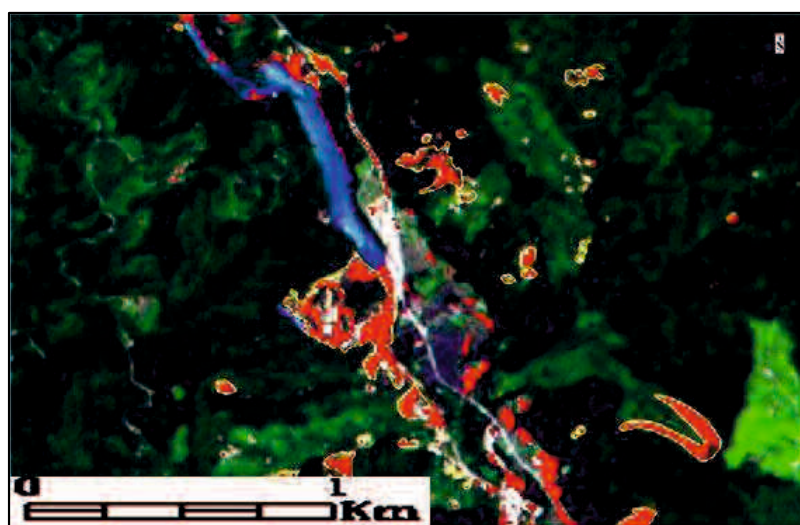


図-3.7 市野々原地区における検出結果

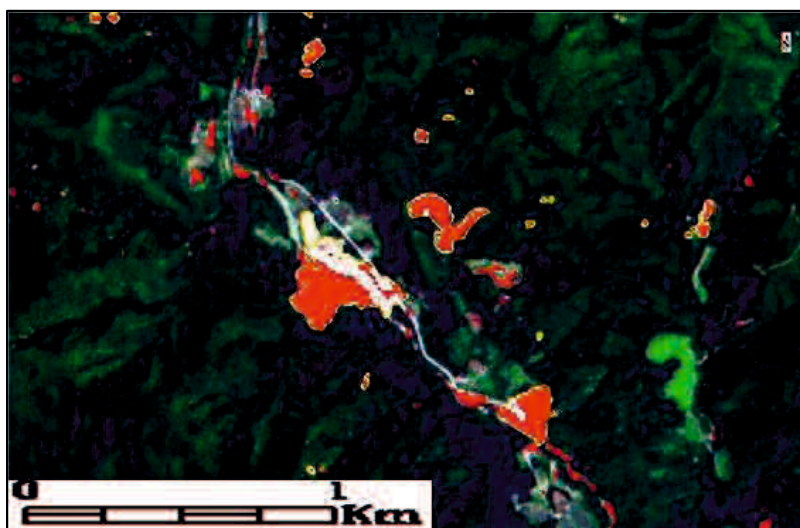


図-3.8 浅布地区における検出結果

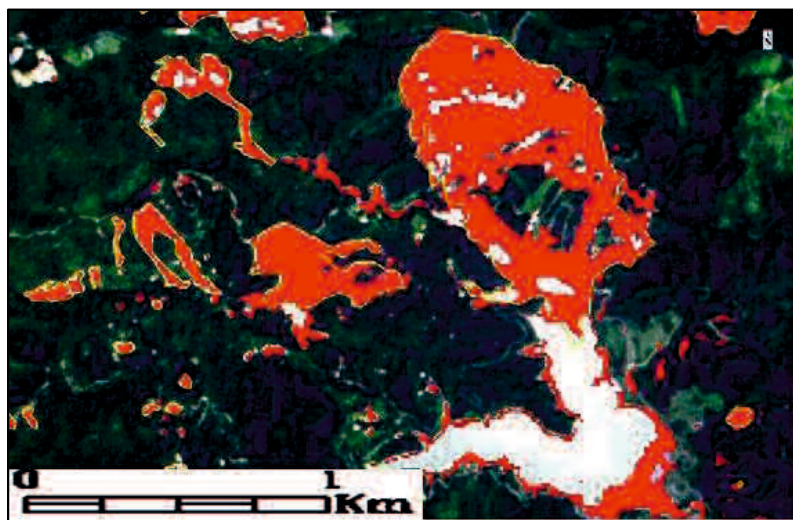


図-3.9 荒砥沢ダム地区における検出結果

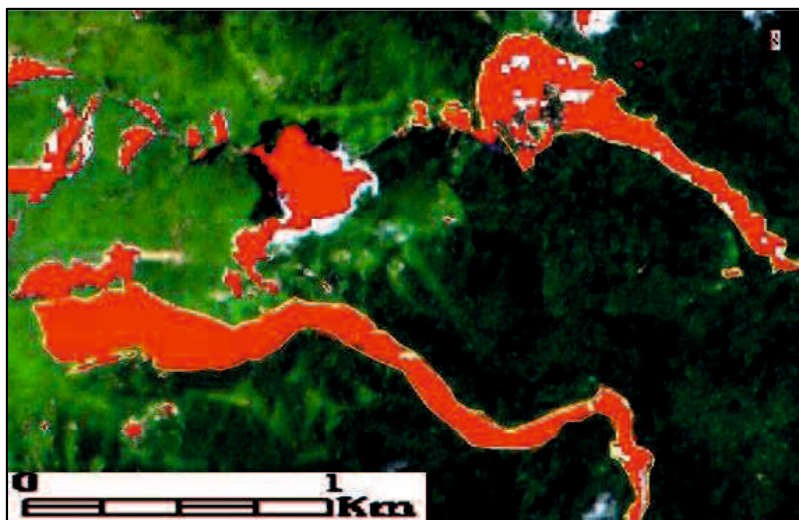


図-3.10 駒ノ湯地区における検出結果

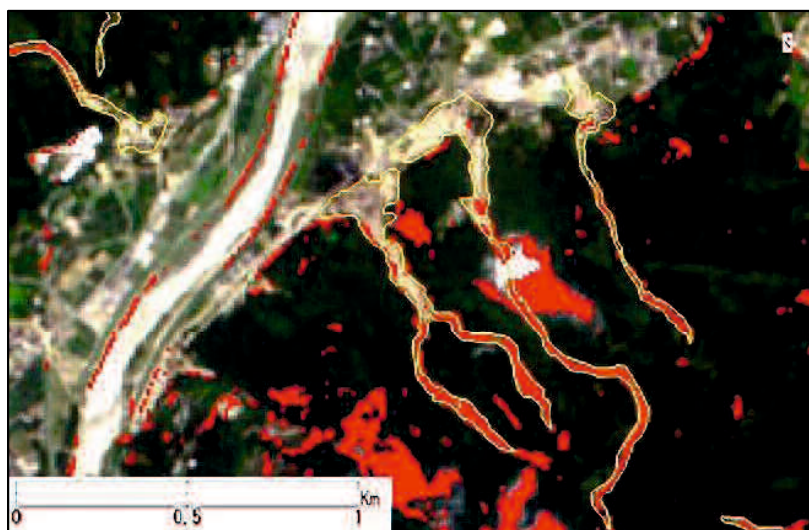


図-3.11 真尾地区における検出結果



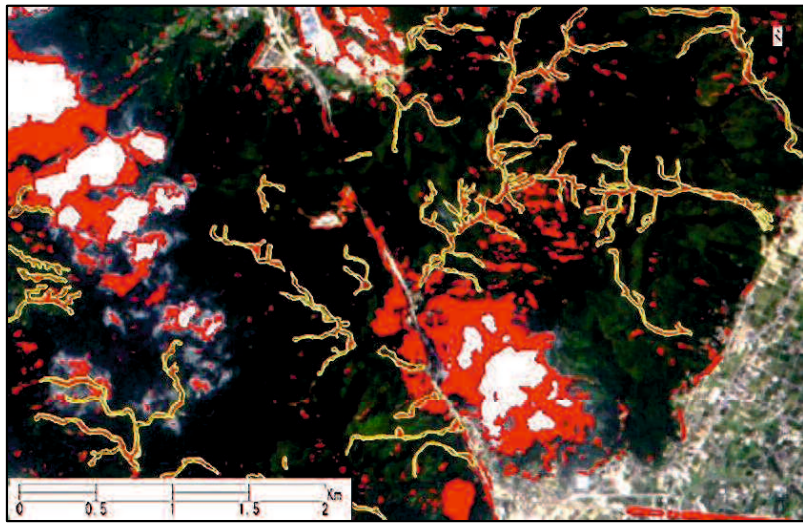


図-3.12 下右田地区における検出結果

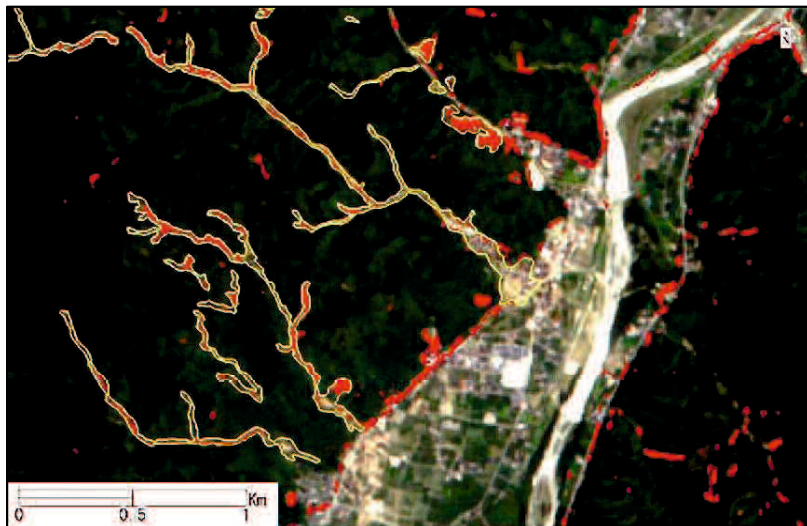


図-3.13 奈美地区における検出結果

図-3.14 に真尾地区における NBR 画像の土砂移動域、植生域、水域、雲域、人工物域のピクセル値のヒストグラムを示す。ヒストグラムはそれぞれ、赤色が土砂移動域 (Soil)、緑色が植生域 (Vegetation)、青色が水域 (Blue)、黒色が雲域 (Cloud)、橙色が人工物域 (Artifact) のものを示す。

図から、NDVI 画像の場合と同様、雲域および人工物域は土砂移動域とほとんどヒストグラムが重なっていることがわかる。すなわち、NBR 画像を用いた場合においても人工物域や雲域をピクセル値によって区別することは困難であるといえる。そのため、これらの領域の誤検出を低減するためには、例えば道路の GIS データや三浦らが提案する日陰領域の除去方法<sup>10)</sup>の活用などが必要だと考えられる。この点については今後の研究において更なる検討を行う必要があることは NDVI 画像を用いた解析と同様である。

次に、各地区における土砂移動箇所の検出結果を表-3.9 と表-3.10 にそれぞれ示す。な

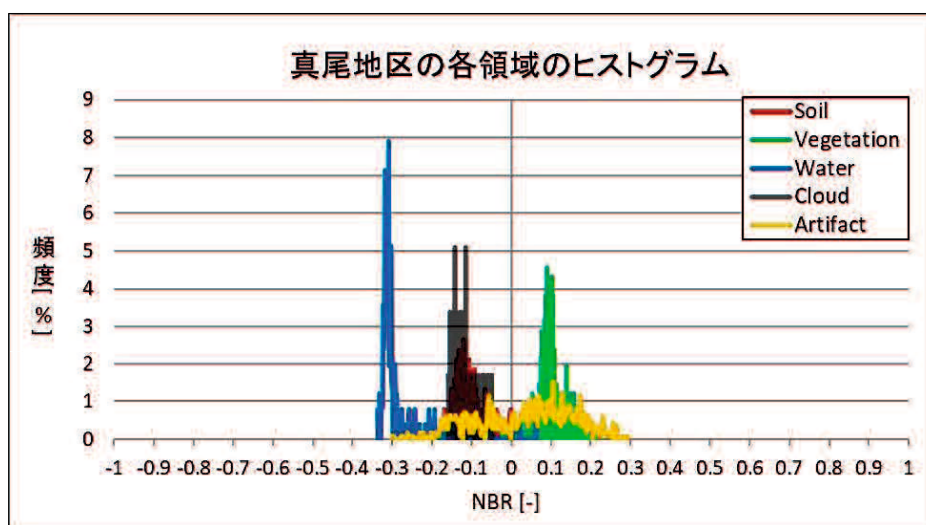


図-3.14 真尾地区における NBR 画像の各領域のヒストグラム

表-3.9 2008 年岩手・宮城内陸地震における各地区の検出結果

地区	市野々原地区	浅布地区	荒砥沢ダム地区	駒ノ湯地区
検出できた土砂移動箇所数 /実際の土砂移動箇所数	19/31	19/22	24/24	5/5

表-3.10 2009 年中国・九州北部豪雨における各地区の検出結果

地区	真尾地区	下右田地区	奈美地区
検出できた土砂移動箇所数 /実際の土砂移動箇所数	4/6	20/33	11/15

お、ここでは実際に発生した土砂移動箇所をどの程度検出できたかを示す検出率のみを示す。

表から、全ての地区において半数以上の土砂移動箇所を検出できており、ヒストグラムの交点より求めた閾値には妥当性があり、災害発生後の NBR 画像からでも土砂移動箇所を検出できることを示すことができた。

### 3.5.2 広域を対象とした場合の検出結果と考察

表-3.7 と表-3.8 の各地区の閾値を比較すると、NDVI 画像を基準とした場合と同様に、2008 年岩手・宮城内陸地震と 2009 年中国・九州北部豪雨の両解析結果において、地区が異なる場合でも閾値は概ね同じであることがわかった。すなわち、NBR 画像を用いる場合でも、1 枚の画像中の土砂移動箇所は場所が異なる場合でも同じ閾値で検出ができる可能性がある。

そこで、各地区の閾値の平均から基準となる閾値を求め、その値を基に広域の土砂移動箇



表-3.11 基準となる閾値

	2008年岩手・宮城内陸地震	2009年中国・九州北部豪雨
土砂移動箇所	-0.23~0.13	-0.21~0.02

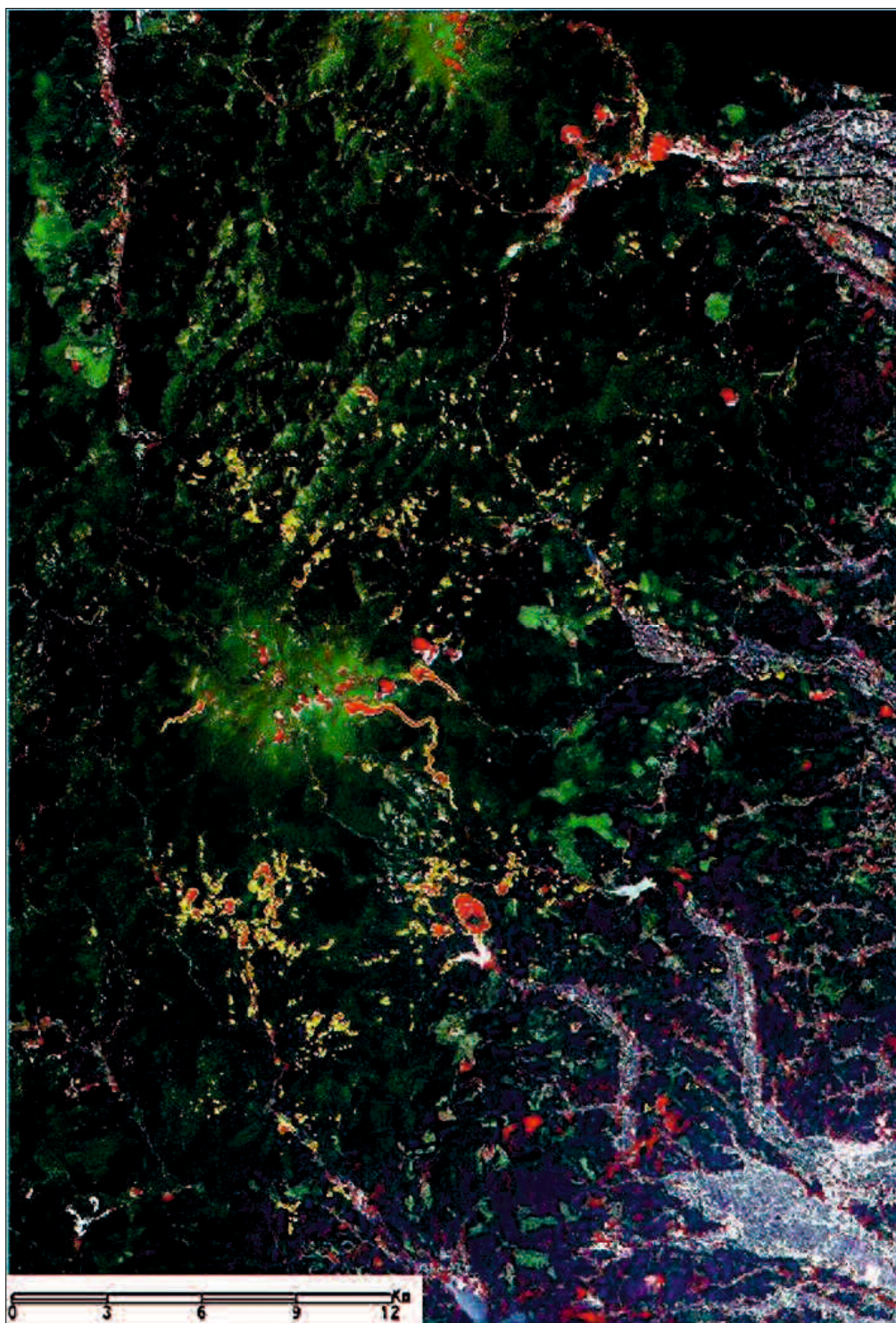


図-3.15 2008年岩手・宮城内陸地震における広域の検出結果



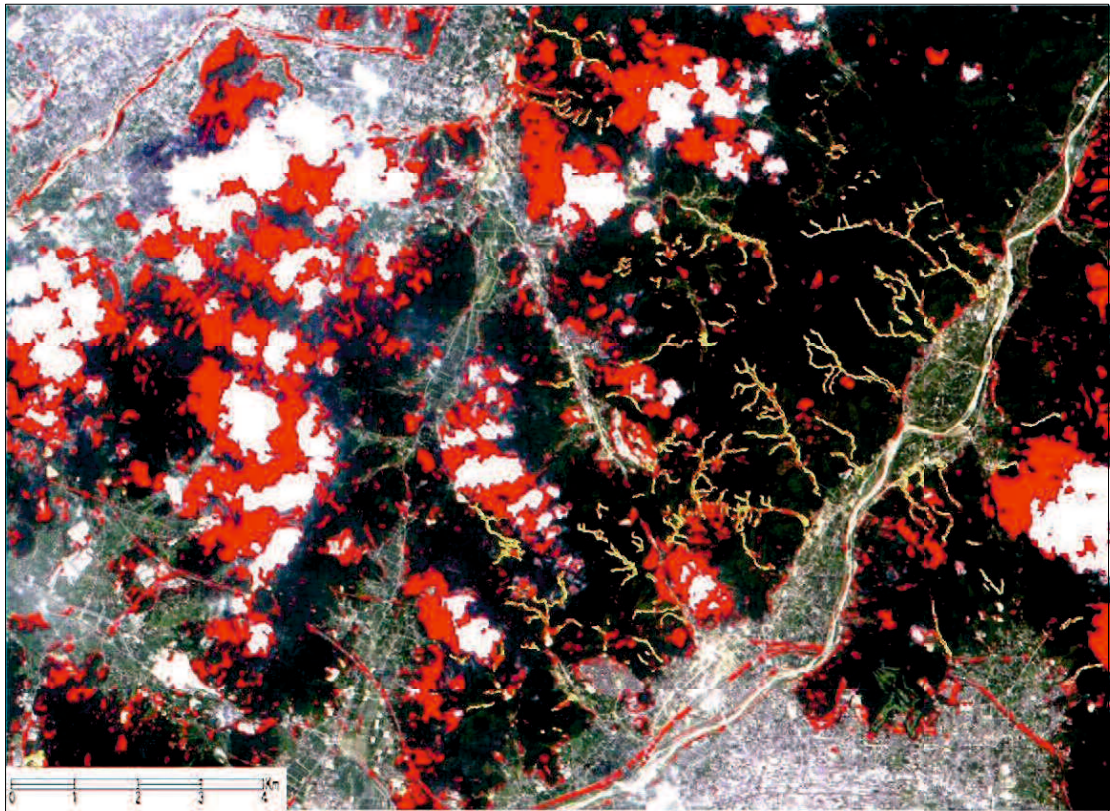


図-3.16 2009年中国・九州北部豪雨における広域の検出結果

所の検出を試みる。また、その検出結果の精度評価を併せて行う。

表-3.11 に各地区の閾値の平均から求めた基準となる閾値を示す。

また、表中の値を基に検出した広域の土砂移動箇所の検出結果を図-3.15 と図-3.16 に示す。図は各地区の検出結果と同様に、TrueColor 合成画像の上に検出結果をオーバーレイしたもので、黄色枠で囲んだ領域が災害判読図を基に作成した実際の土砂移動箇所、赤く表示した領域が閾値を基に検出した土砂移動箇所を示す。

広域の検出結果を目視判読すると、概ね土砂移動箇所を検出できたことが確認できる。また、NDVI 画像を用いた場合と比べて、誤検出が少ないことが確認できる。例えば、2008年岩手・宮城内陸地震における検出結果（図-3.15）では、画像右下隅のコントラストの低い植生域において、NBR 画像を用いた場合の方が、NDVI 画像を用いた場合と比べて誤検出が大幅に少ない。また、このようなコントラストの低い植生域における誤検出は、画像全体で NBR 画像を用いた場合の方が少ない結果となった。

しかし、2009年中国・九州北部豪雨にける検出結果（図-3.16）では、NBR 画像、NDVI 画像どちらを用いた場合でも、検出結果に大きな違いはなかった。これは画像全体に雲や雲の影が散在しており、どちらの画像を用いた場合でもこれらの領域を誤検出してしまったためである。そのため、NBR 画像や NDVI 画像を用いて土砂移動箇所の検出を行う場合は、目視ではっきりと確認できる雲だけでなく薄い雲やその影の影響ができるだけ少ない画像

を使用する必要がある。

次に広域を対象とした場合の検出精度について説明する。ここで、検出精度は、正解データの中から、最大面積、平均面積、最小面積の土砂移動箇所を中心に 50 箇所程度の土砂移動箇所が含まれる範囲を検証エリア 1, 2, 3 として、3 つの検証エリアにおける検出率と正答率の平均値を検出精度として評価した。なお、2009 年中国・九州北部豪雨では、災害判読図の都合上、十分な正解データを準備することができなかつたため、図-3.16 に示す範囲全体を検証エリアとした。

表-3.12 から表-3.15 にそれぞれの検出結果と検出精度をまとめて示す。ここで、表中の  $O_{true}$  は実際の土砂移動箇所、 $O_{result}$  は検出できた土砂移動箇所、 $\times_{true}$  は実際には発生していない土砂移動箇所、 $\times_{result}$  は検出できなかった土砂移動箇所であり、括弧内の数値はその箇所数を表す。

2008 年岩手・宮城内陸地震の結果から、NBR 画像を用いた場合の検出精度は検出率 80% 以上、正答率 20% 程度であり、NDVI 画像を用いた場合と比べて、検出率は低いが高正答率が高い結果を得られることがわかった。一方、2009 年中国・九州北部豪雨の結果から、豪雨災害を対象とした場合、NBR 画像、NDVI 画像どちらを用いた場合でも、検出結果に大きな違いはないことがわかった。

表-3.12 2008 年岩手・宮城内陸地震における検証エリア 1 の検出結果と検出精度

		正解データ	
		$O_{true}$ (75)	$\times_{true}$
検出結果	$O_{result}$ (475)	72	403
	$\times_{result}$	3	

(b) 検出精度	
検出率	96%
未検出率	4%
正答率	15%
誤検出率	85%

表-3.13 2008 年岩手・宮城内陸地震における検証エリア 2 の検出結果と検出精度

		正解データ	
		$O_{true}$ (56)	$\times_{true}$
検出結果	$O_{result}$ (153)	45	108
	$\times_{result}$	11	

(b) 検出精度	
検出率	80%
未検出率	20%
正答率	29%
誤検出率	71%

表-3.14 2008年岩手・宮城内陸地震における検証エリア3の検出結果と検出精度

		正解データ	
		<i>Otrue</i> (69)	<i>Xtrue</i>
検出結果	<i>Oresult</i> (183)	50	133
	<i>Xresult</i>	19	

(b) 検出精度	
検出率	72%
未検出率	28%
正答率	27%
誤検出率	73%

表-3.15 2009年中国・九州北部豪雨における検証エリアの検出結果と検出精度

		正解データ	
		<i>Otrue</i> (56)	<i>Xtrue</i>
検出結果	<i>Oresult</i> (6702)	80	6622
	<i>Xresult</i>	31	

(b) 検出精度	
検出率	73%
未検出率	27%
正答率	3%
誤検出率	97%

次に、対象とする土砂移動箇所を 500m<sup>2</sup>以上とした場合の検出結果について説明する。

表-3.16 から表-3.19 に 500m<sup>2</sup>以上の土砂移動箇所を対象とした場合の検出結果と検出精度を示す。

対象とする土砂移動箇所を 500m<sup>2</sup>以上に限定した場合、2008年岩手・宮城内陸地震における検出率は 80%、正答率は 52%であり、対象を限定することでより誤検出が少なく土砂移動箇所を検出できることがわかった、しかし、2009年中国・九州北部豪雨では、対象を限定する前と後で大きな違いは見られなかった。

ここで、対象を限定する前には検出できた土砂移動箇所が限定後では検出できなかった箇所があり検出率が若干低下した。これは、NDVI 画像を用いた場合と同様であり、実際の土砂移動箇所の面積が 500m<sup>2</sup>以上かつ検出結果が 500m<sup>2</sup>未満だった土砂移動箇所にみられ、対象を 500m<sup>2</sup>以上に限定したことで、検出対象ではあるものの検出結果が除外されたことで検出できなかったからである。

一方、対象を限定することで小さな誤検出を除去することができ、正答率が向上することも確認できた。ここで誤検出について調べた結果、NBR 画像を用いた場合、NDVI 画像を用いた場合よりも誤検出が少ない（約 3 分の 1）ことがわかった。また、誤検出の 53 箇所（約 5 割）が災害判読図では土砂移動箇所として記載されていないが TrueColor 合成画像や GoogleEarth では土壌が露出しているように見える領域、44 箇所（約 3 割）が道路など人工物、18 箇所（約 1 割）がコントラストの低い植生域、21 箇所が（約 1 割）が災害前か



ら土壌が露出していた裸地や河川などその他の誤検出であることがわかった。そのため、NDVI 画像を用いた場合と同様に、道路や家屋などの GIS データを活用することで約 2 割の誤検出を低減することが可能であり、正答率の向上が期待できる。

表-3.16 500m<sup>2</sup>以上の土砂移動箇所を対象とした場合の  
2008 年岩手・宮城内陸地震における検証エリア 1 の検出結果と検出精度

		正解データ	
		<i>Otrue</i> (72)	<i>Xtrue</i>
検出結果	<i>Oresult</i> (204)	69	135
	<i>Xresult</i>	3	/
検出率	96%		
未検出率	4%		
正答率	34%		
誤検出率	66%		

表--3.17 500m<sup>2</sup>以上の土砂移動箇所を対象とした場合の  
2008 年岩手・宮城内陸地震における検証エリア 2 の検出結果と検出精度

		正解データ	
		<i>Otrue</i> (56)	<i>Xtrue</i>
検出結果	<i>Oresult</i> (66)	44	22
	<i>Xresult</i>	12	/
検出率	79%		
未検出率	21%		
正答率	67%		
誤検出率	33%		

表-3.18 500m<sup>2</sup>以上の土砂移動箇所を対象とした場合の  
2008 年岩手・宮城内陸地震における検証エリア 3 の検出結果と検出精度

		正解データ	
		<i>Otrue</i> (65)	<i>Xtrue</i>
検出結果	<i>Oresult</i> (59)	41	18
	<i>Xresult</i>	24	/
検出率	63%		
未検出率	37%		
正答率	69%		
誤検出率	31%		

表-3.19 500m<sup>2</sup>以上の土砂移動箇所を対象とした場合の

2009年中国・九州北部豪雨における検証エリアの検出結果と検出精度

		正解データ	
		<i>O</i> true (109)	<i>X</i> true
検出結果	<i>O</i> result (2356)	72	2276
	<i>X</i> result	31	

(b) 検出精度	
検出率	73%
未検出率	27%
正答率	3%
誤検出率	97%

次に、表-3.20 に 2008 年岩手・宮城内陸地震および 2009 年中国・九州北部豪雨における NDVI 画像を用いた場合と NBR 画像を用いた場合の検出精度を比較して示す。なお、2008 年岩手・宮城内陸地震の検出精度は、検証エリア 1, 2, 3 の平均値である。

NDVI 画像を用いた場合と NBR 画像を用いた場合の検出精度の比較から、NDVI 画像を用いた検出は、NBR 画像を用いた検出では検出することができなかった 33 箇所の土砂移動箇所を検出することができ、より高い検出率で見落としが少なく土砂移動箇所を検出できる特徴があることがわかった。しかし、得られる結果には誤検出が多いという特徴があることもわかった。

一方、NBR 画像を用いた検出は、NDVI 画像を用いた検出と比べて、土砂移動箇所の見落としがあることがわかった。しかし、得られる結果は NDVI 画像を用いた検出と比べて誤検出が 286 箇所少なく、より高い正答率で誤検出が少なく土砂移動箇所を検出できる特徴があることもわかった。すなわち、それぞれの検出手法には長所・短所があり、NDVI 画像を用いた検出手法は土砂移動箇所の見落としが少ない情報を得ることができ、NBR 画像を用いた検出手法は誤検出が少ない情報を得ることができる。そのため、例えば、NDVI 画像を用いた場合の検出結果は、航空機やヘリコプターなどの飛行計画を立てる際に有効な情報となり、NBR 画像を用いた場合の検出結果は、自衛隊や救援隊の派遣先を決める際に有効な情報になると考えられる。

表-3.20 2008 年岩手・宮城内陸地震および 2009 年中国・九州北部豪雨における検出精度

	2008 年岩手・宮城内陸地震		2009 年中国・九州北部豪雨	
	NDVI 画像	NBR 画像	NDVI 画像	NBR 画像
検出率	99%	80%	93%	73%
未検出率	1%	20%	7%	27%
正答率	33%	56%	4%	3%
誤検出率	67%	44%	96%	97%

### 3.6 NBR 画像を用いた 2016 年熊本地震による土砂移動箇所の検出の試み

全節までの結果より、災害発生後の NBR 画像からでも土砂災害の原因となる土砂移動箇所を検出できること示せた。

ここでは、検出手法の汎用性について検討するため、2016 年熊本地震<sup>17)</sup>において発生した土砂災害を対象として WorldView-2<sup>18)</sup>データを用いて土砂移動箇所の検出を試みる。

#### 3.6.1 解析対象と使用データ

ここでは、2016 年 4 月 14 日と 16 日に発生した熊本県地震を対象として、地震発生から約半月が経過した 2016 年 5 月 5 日に観測された WorldView-2 データを用いて解析を行う。また、衛星データ以外のデータとして植生図、地理院地図、災害判読図、DEM のデータを使用する。なお、災害の概要と使用するデータについては 2.6.1 で前述したため、ここでの説明は割愛する。

図-3.17 に対象とする南阿蘇村立野地区の位置と範囲を示す。



図-3.17 2016 年熊本地震における解析対象地区の位置と範囲

#### 3.6.2 熊本県南阿蘇村立野地区を対象とした場合の検出結果と考察

図-3.18 に南阿蘇村立野地区における土砂移動域・植生域・水域のヒストグラムを示す。ここでは、ヒストグラムの交点より、 $-0.18 \sim -0.08$  を閾値とする。

閾値を基に検出した南阿蘇村立野地区の検出結果を図-3.19、検出精度を表-3.21 にそれぞれ示す。なお、ここでは、3.5.2 の結果を基に  $500\text{m}^2$  以上の土砂域を対象とした場合の結果のみ示す。

ここでは、検出率 91%で土砂移動箇所を検出できており、土砂移動箇所を見落としが少

なく検出できた。また、NDVI 画像を用いた場合では検出できなかった阿蘇大橋周辺の大きな土砂移動箇所を検出できた。しかし、NDVI 画像を用いた場合と同様に、実際は土砂移動箇所ではない領域を土砂移動箇所として誤検出している箇所があり、正答率は 21%であった。例えば、画像中央左や右下隅、山の植生域に赤色の領域または赤色の筋がみられ、

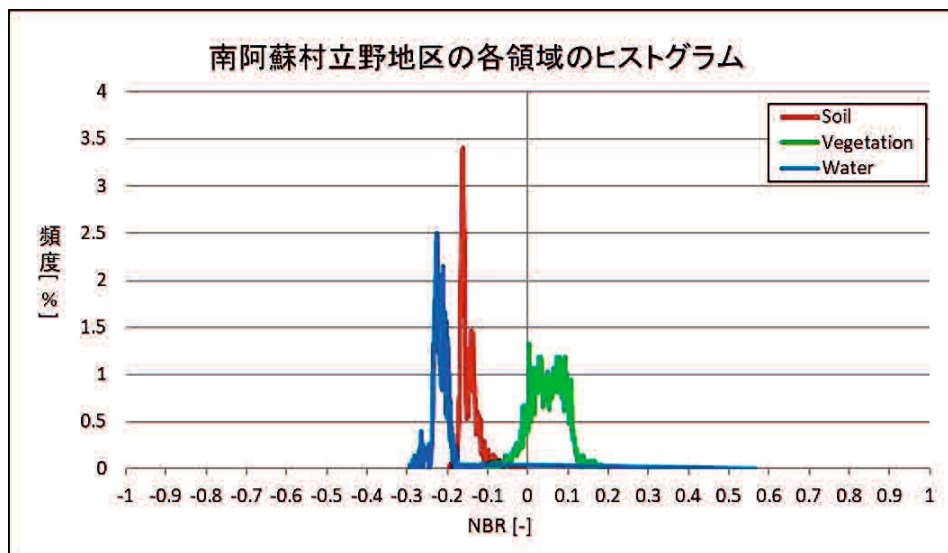


図-3.18 南阿蘇村立野地区における各領域のヒストグラム

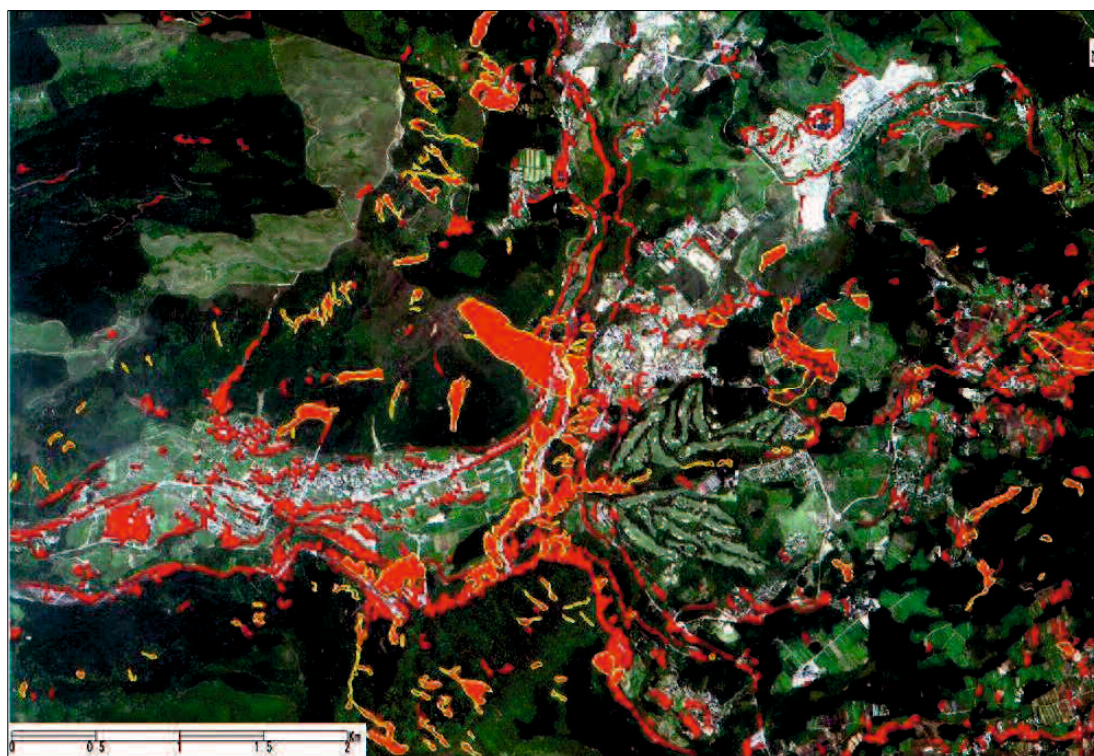


図-3.19 南阿蘇村立野地区における検出結果

表-3.21 南阿蘇村立野地区における検出結果と検出精度

(a) 検出結果

		正解データ	
		<i>Otrue</i> (121)	<i>Xtrue</i>
検出結果	<i>Oresult</i> (524)	110	414
	<i>Xresult</i>	11	

(b) 検出精度

検出率	91%
未検出率	9%
正答率	21%
誤検出率	79%

GoogleEarth でこれらの場所を確認したところ、画像中央左や右下隅に点在する赤色の領域の内、大きいものは工事により土壌が露出している裸地であり、小さいものは作物が育成されていない畑、赤色の筋は道路であることがわかった。このような誤検出を低減するためには、田畑の耕作地や道路の GIS データの活用が有効であることは NDVI 画像を用いた場合と同様である。一方、山の植生域に見られる赤色の領域は、TrueColor 合成画像で確認したところ、周りの植生域と比べ樹木の密度が低く地表面の土壌が上空から確認できる場所であることがわかった。これらの誤検出は、中分解能衛星 ALOS/AVNIR-2 画像を用いた場合には見られず、高分解能衛星画像を用いた場合にのみ検出された。そのため、高分解能衛星画像を用いる場合はこのような誤検出があることに留意する必要がある。なお、これらが土砂移動箇所であるか否かは GoogleEarth や TrueColor 合成画像では判断することができなかつたため、ここでは、災害判読図に土砂移動箇所として記載されていないという理由から、これらを誤検出と判断した。

以上の結果より、本章で提案する災害発生後の NBR 画像を用いた検出手法は、2016 年熊本地震を対象として WorldView-2 データを用いた場合でも、500m<sup>2</sup>以上の規模の土砂移動箇所を検出率約 90%、正答率約 20%で検出できることを示すことができた。

### 3.7 結語

本章では、土砂移動域・植生域・水域がそれぞれ異なる値を示す新たな指標として、NIR, Blue, Redの3Bandを組み合わせたNBRを考案し、2008年岩手・宮城内陸地震と2009年中国・九州北部豪雨において発生した土砂災害を対象として、NBR画像を用いた検出を試みた。また、検出手法の汎用性について検討を行うため、2016年熊本地震を対象としてWorldView-2データを用いた検出も試みた。

その結果、以下に示す知見を得ることができた。

①2008 年岩手・宮城内陸地震および 2009 年中国・九州北部豪雨における各地区を対象とした検出結果から、災害発生後の NBR 画像における土砂移動域・植生域・水域のヒスト

グラムとの交点を閾値とすることで、災害発生後のみの NBR 画像からでも土砂移動箇所を検出でき、その結果に道路や家屋などの GIS データを併用することで土砂災害の発生箇所を特定できることを示すことができた。また、各地区の閾値は地区が異なる場合でも概ね同じであることがわかった。

②広域を対象とした検出結果から、2008 年岩手・宮城内陸地震では閾値を $-0.23\sim 0.13$ 、2009 年中国・九州北部豪雨では閾値を $-0.21\sim 0.02$  とすることで、災害発生後の NBR 画像から同じ閾値で広域の各土砂移動箇所を検出できることを示すことができた。また、 $500\text{m}^2$ 以上の規模の土砂移動箇所を対象とした場合、2008 年岩手・宮城内陸地震では土砂域を検出率 80%、正答率 52%、2009 年中国・九州北部豪雨では検出率 73%、正答率 3%の検出精度で検出でき、NDVI 画像を用いた場合と比べて土砂移動箇所を誤検出が少なく検出できることを示すことができた。しかし、NDVI 画像を用いた場合と同様に、道路や畑、また雲や雲の影といった場所を誤検出してしまう。そのためこれらの誤検出を低減するためには道路や畑などの GIS データを活用した手法について検討を行う必要があり、道路における誤検出を除去することで、約 2 割の誤検出の低減が期待できる。

③また、NDVI 画像、NBR 画像を用いた場合の検出精度の比較から、それぞれの検出手法には特徴があり、NDVI 画像を用いた検出手法は土砂移動箇所の見落としが少ない情報を得ることができ、NBR 画像を用いた検出手法は誤検出が少ない情報を得ることがわかった。すなわち、NDVI 画像を用いた場合の検出結果は、航空機やヘリコプターなどの飛行計画を立てる際に有効な情報となり、NBR 画像を用いた場合の検出結果は、自衛隊や救援隊の派遣先を決める際に有効な情報になると考えられる。

④2016 年熊本地震を対象とした検出結果から、WorldView-2 データを用いた場合でも、 $500\text{m}^2$ 以上の規模の土砂移動箇所を対象とした場合、検出率 91%、正答率 21%の検出精度で土砂移動箇所を検出できることを示すことができた。しかし、WorldView-2 など高分解能衛星画像を使用した場合、NBR 画像を用いた場合でも樹木の密度が低く地表面の土壌が上空から確認できる場所などを誤検出してしまう場合があり、このことについて留意する必要があることがわかった。



## 参考文献

- 1) Tucker, C. J. : Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sensing of Environment*, Vol.8, No.2, pp.127-150, 1979.
- 2) 江口毅, 三浦房紀 : 衛星リモートセンシングを用いた斜面崩壊域早期発見手法の検討, 第 14 回日本地震工学シンポジウム, OS12-Sat-AM-4, 2014.
- 3) Eguchi, T. and Miura, F. : A study on detecting the locations of slope failure due to earthquakes and heavy rains by using satellite remote sensing, 8th Asian Rock Mechanics Symposium, PO-58, 2014.
- 4) 江口毅, 三浦房紀, 栗田昌志 : 衛星リモートセンシングを用いた豪雨による土砂災害域のスペクトル特性に関する検討, 土木学会中国支部平成 26 年度研究発表会, IV-22, 2013.
- 5) 内閣府防災担当 : 平成 20 年岩手・宮城内陸地震フォローアップ調査報告書, [http://www.bousai.go.jp/kaigirep/houkokusho/hukkousesaku/pdf/fukkou\\_chousa201003.pdf](http://www.bousai.go.jp/kaigirep/houkokusho/hukkousesaku/pdf/fukkou_chousa201003.pdf), 2010.
- 6) 内閣府防災担当 : 平成 21 年 7 月中国・九州北部豪雨による被害状況等について, <http://www.bousai.go.jp/updates/090721ooame/pdf/100326higaizyoukyou024.pdf>, 2010.
- 7) 宇宙航空研究開発機構第一宇宙技術部門 : 人工衛星プロジェクトだいち (ALOS) , <http://www.satnavi.jaxa.jp/project/alos/gaiyo.html>.
- 8) 環境省自然環境局 : 1/2.5 万現存植生図, <http://www.vegetation.biodic.go.jp/>.
- 9) 国土交通省国土地理院 : 地理院地図, [https://maps.gsi.go.jp/#12/32.783522/131.139679/&ls=\\_ort&disp=1&lcd=\\_ort&vs=c1j0h0k0l0u0t0z0r0s0f1&d=vl](https://maps.gsi.go.jp/#12/32.783522/131.139679/&ls=_ort&disp=1&lcd=_ort&vs=c1j0h0k0l0u0t0z0r0s0f1&d=vl).
- 10) 国土交通省国土地理院 : 地理院地図で得られる値等について, <https://maps.gsi.go.jp/help/how-touse.html>.
- 11) アジア航測株式会社 : <http://www.ajiko.co.jp/article/detail/ID4TC295YV5/>.
- 12) 国際航業株式会社 : [http://www.kkc.co.jp/service/bousai/csr/disaster/200707\\_nigata/Index.html](http://www.kkc.co.jp/service/bousai/csr/disaster/200707_nigata/Index.html).
- 13) 宇宙航空研究開発機構 : リモートセンシング基礎講座, [http://www.eorc.jaxa.jp/hatoyama/experience/rm\\_kiso/top.html](http://www.eorc.jaxa.jp/hatoyama/experience/rm_kiso/top.html).
- 14) 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, 水指数の開発, 写真測量とリモートセンシング, 第 43 巻, 第 6 号, pp.7-19, 2004.
- 15) 江口毅, 三浦房紀 : 衛星リモートセンシングを用いた地震および豪雨による斜面崩壊発生箇所の早期発見手法, 土木学会論文集 F6 (安全問題) , 第 72 巻, 第 1 号, pp.11-20, 2016.
- 16) 三浦弘之, 翠川三郎 : 建物 GIS データの更新を目的とした高分解能衛星画像からの建物自動検出手法, 地域安全学会論文集, 第 5 巻, pp.37-44, 2003.
- 17) 国土交通省 : 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震について (第 56 報) , <http://www.mlit.go.jp/common/001257342.pdf>.
- 18) 一般財団法人リモート・センシング技術センター : <https://www.restec.or.jp/satellite/worldview-2>.



## 4 災害発生後の単偏波画像を用いた土砂災害検出手法

### 4.1 緒言

第2章と第3章では、災害発生後の光学センサ画像を用いた土砂移動箇所を検出を試み、NDVI画像を用いた検出手法では見落としが少なく、NBR画像を用いた検出手法では誤検出が少なく土砂移動箇所を検出できることを示すことができた。しかし、被災地域が雲で覆われることの多い豪雨災害時には、雲や雲の影となる領域を誤検出してしまうため、土砂移動箇所を精度良く検出することができなかつた。また、光学センサ画像を用いた検出手法は、太陽光のない夜間には適用することができない。

合成開口レーダ (Synthetic Aperture Rader : SAR) <sup>1)</sup>は太陽光よりも波長が長いマイクロ波をセンサ自身が地表面へ照射し、その散乱波を受信することで地表面の観測を行うため、被災地域が雲で覆われている場合や太陽光のない夜間においても観測が可能である。そのため、光学センサでは観測が行えない降雨時や夜間の被害状況把握に有効である。このような観点から、林らや松岡・山崎による災害発生前後の SAR 強度画像の相関係数差分解析 <sup>2,3)</sup>や NDPI (Normalized Difference Polarization Index) の差分解析 <sup>4)</sup>、渡邊らや島田らによる偏波間コヒーレンス解析 <sup>5,6)</sup>、矢来らによる InSAR 解析 <sup>7)</sup>といった手法を用いた災害発生域の検出に関する研究が行われている。

しかし、これら既往研究の手法は災害発生前後の 2 時期の画像が入手できることが前提とされているため、条件の良い災害発生前画像が得られない場合には、解析が困難であったり、解析を行うための前処理に時間を要したりする等の課題がある。

そこで本章では、条件の良い災害発生前画像が得られない場合を想定して、災害発生後のみの SAR 画像を用いた土砂災害の検出手法の開発を行う。具体的には、平成 26 年 8 月豪雨 <sup>8)</sup>において発生した広島市の土砂災害を対象として、災害発生後に観測された ALOS-2/PALSAR-2<sup>9)</sup>データを用いて検出を試みる。

### 4.2 解析対象

本章では、平成 26 年 8 月豪雨によって発生した広島市における土砂災害を対象に解析を行う。

平成 26 年の 7 月 8 日には、2 度の台風接近による影響と前線の停滞により全国的に記録的な大雨が記録された。特に広島市では、8 月 19 日の夜から 20 日の明け方にかけて集中豪雨が発生し、安佐北区では 1 時間雨量が最大 121mm、24 時間累積雨量が最大で 287mm となる観測史上最大の雨量が記録された。また、安佐南区では 1 時間雨量が最大 87mm、

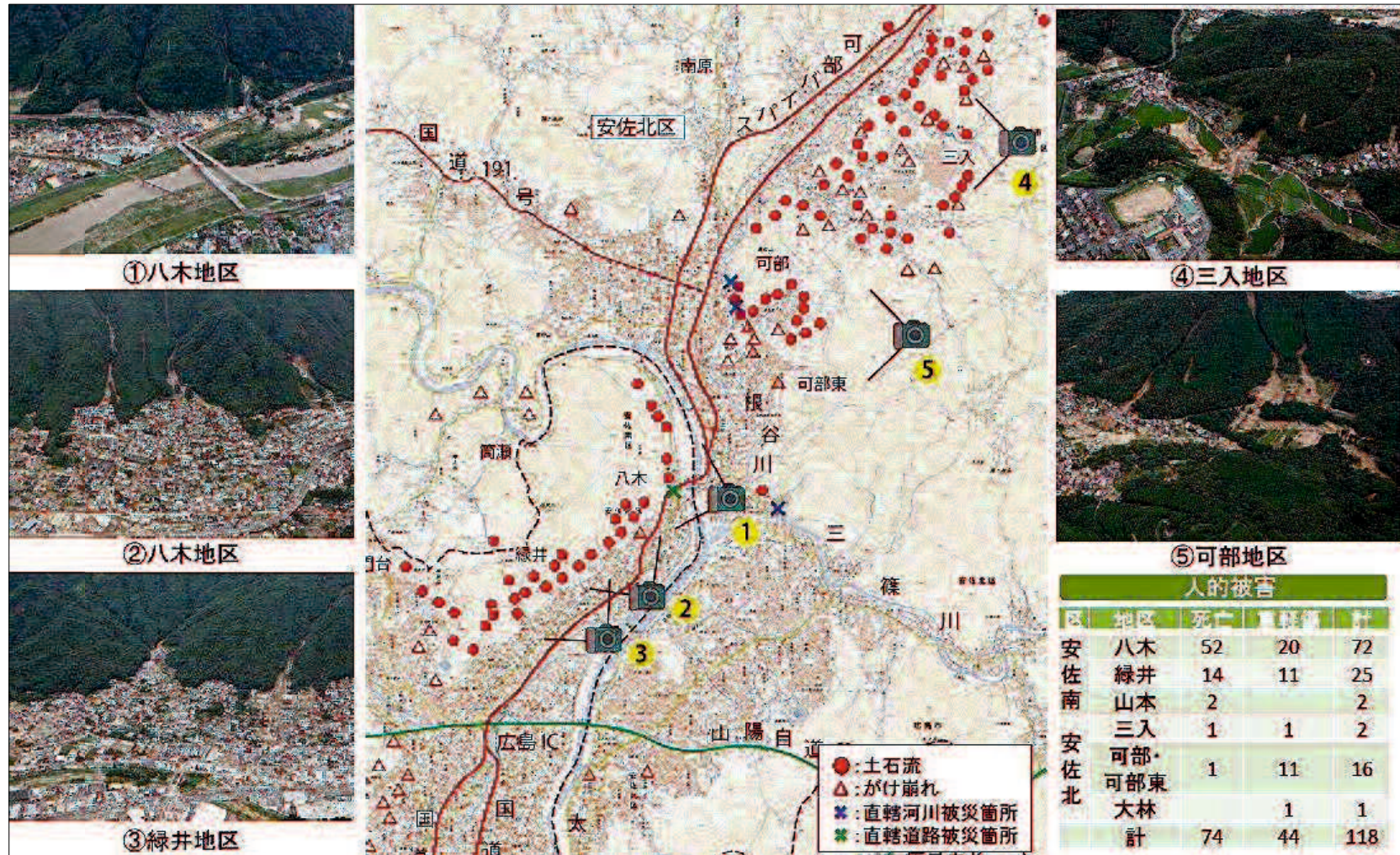


図-4.1 平成 26 年 8 月豪雨における土砂災害発生箇所的位置<sup>10)</sup>



24 時間累積雨量が 247mm の雨量が記録された<sup>8)</sup>。また、この豪雨により、これらの地域では同時多発的に大規模な土砂災害が発生し、74 名の死者を出す甚大な被害となった<sup>10)</sup>。**図-4.1** は広島市災害対策本部によってまとめられた、土砂災害 166 箇所(土石流 107 箇所、崖崩れ 59 箇所) の位置と様子を示したものである<sup>10)</sup>。図から、広島市全域ではなく広島市の安佐北区と安佐南区において集中的に土石流が発生している様子がわかる。

## 4.3 使用データ

### 4.3.1 衛星データ

本章では、災害発生後に観測された ALOS-2/PALSAR-2 のデータを用いて解析を行う。

ALOS-2 とは、2014 年 5 月 24 日に打ち上げられた ALOS (だいち) の後継機であり、防災機関における広域かつ詳細な被災地の情報把握、国土情報の継続的な蓄積・更新、農作地の面積把握の効率化などのミッションを目的とした地球観測衛星である<sup>9)</sup>。

ALOS-2 の概要図と主要諸元を**図-4.2** と**表-4.1** にそれぞれ示す。また、PLASAR-2 の主要諸元を**表-4.2** に示す。なお、**表-4.1** と**表-4.2** は宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace eXploration Agency : JAXA) が公開している情報<sup>9)</sup>から一部抜粋したものである。

ALOS-2 は ALOS と比べて回帰日数が 30 日程早く、1 日に 2 回 12:00 と 24:00 前後に日本を観測することが可能である。また、ALOS-2 には ALOS に搭載されていた L バンド合成開口レーダ (PALSAR) を高性能化させた合成開口レーダである PALSAR-2 が搭載されており、ALOS/PALSAR と比べて分解能が向上したことでより詳細な被害状況の把握が可能になった。さらに、ALOS にはなかった左右観測機能により、より高頻度での観測も可能になった。

本章では、平成 26 年 8 月豪雨発生直後の 2014 年 8 月 20 日に観測された ALOS-2/PALSAR-2 データを使用する。**表-4.3** に本章で使用する ALOS-2/PALSAR-2 データについて示す。データは、Descending (南向き降下) 軌道右向きで観測されたものであり、処理レベル 1.5 のフルポラリメトリ (HH, HV, VH, VV) のデータである。偏波とは、時間的に変動する電場の振幅と振動方向の関係を記述するものであり、電界ベクトルの向きにより水平偏波 (振幅が進行方向に対して水平 : H) と垂直偏波 (振幅が進行方向に対して垂直 : V) に分類され、送受信の組み合わせで HH, HV, VH, VV (1 文字目 : 照射、2 文字目 : 受信) と表現されるものである<sup>11)</sup>。**図-4.3** に水平偏波と垂直偏波の概念図を示す<sup>12)</sup>。

ここで、処理レベルが 1.1, 1.5, 2.1 とある中で処理レベル 1.5 のデータを使用する理由について説明する。

処理レベル 2.1 の SAR 画像は、数値標高モデル (Digital Elevation Model : DEM)<sup>13)</sup>を用いたオルソ補正<sup>14)</sup>が施されており、鉛直方向に正射投影した画像である。そのため、**図-4.4** に示すような、観測方法に起因する SAR 画像特有の歪み (フォアショートニング、

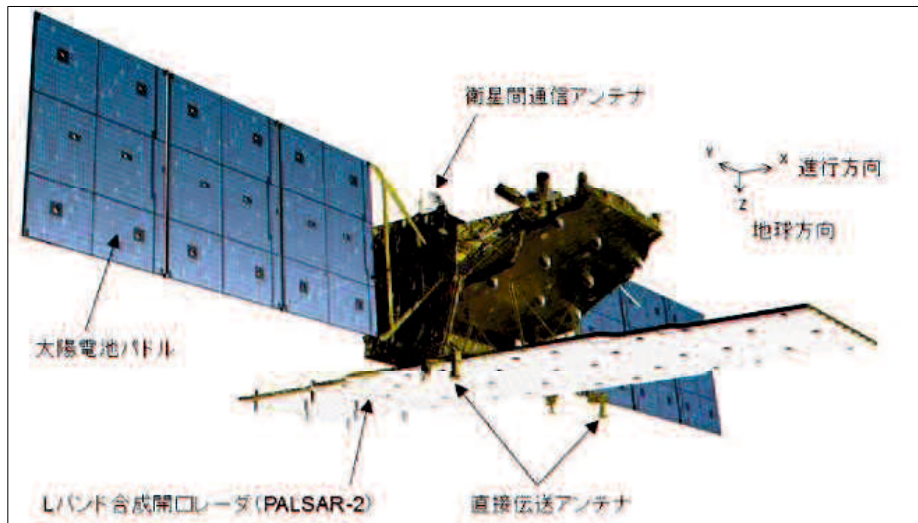


図-4.2 ALOS-2 の概要<sup>9)</sup>

表-4.1 ALOS-2 の主要諸元<sup>9)</sup>

打ち上げ日	2014年5月24日
打ち上げ機	H-IIA ロケット
設計寿命	5年(目標7年)
軌道	太陽同期 準回帰軌道
	回帰日数: 14日
	傾斜角: 97.9°

表-4.2 PALSAR-2 の主要諸元<sup>9)</sup>

偏波	HH, HV, VH, VV
観測モード	スポットライト、高分解能、広域観測
地上分解能	3~60m (観測モードによって異なる)
観測幅	25~490km (観測モードによって異なる)

表-4.3 使用する ALOS-2/PALSAR-2 データ

衛星/センサ	ALOS-2/PALSAR-2
観測日	2014年8月20日 (発災直後)
観測条件	軌道: Descending 観測向き: 右向き
偏波	HH, HV, VH, VV
分解能	3m
処理レベル	1.5



レイオーバー、シャドウイング) 14)が補正されており、地図との重ね合わせの際に位置のずれが生じない。一方、処理レベル 1.5 の SAR 画像には SAR 画像特有の歪みがあるため、これにより地図との重ね合わせの際に位置のずれが生じる。

図-4.5 に処理レベル 2.1 と処理レベル 1.5 の画像を用いた場合の解析結果の例を比較して示す。画像は HH 偏波の画像において同じ閾値を用いて土砂移動が発生した場所（以下、土砂移動箇所と呼ぶ）を検出した結果である。画像中の赤色で表示した領域が検出した土砂移動箇所を示す。

それぞれの検出結果の比較から、処理レベル 2.1 の結果（図-4.5(a)）では山の大部分を土

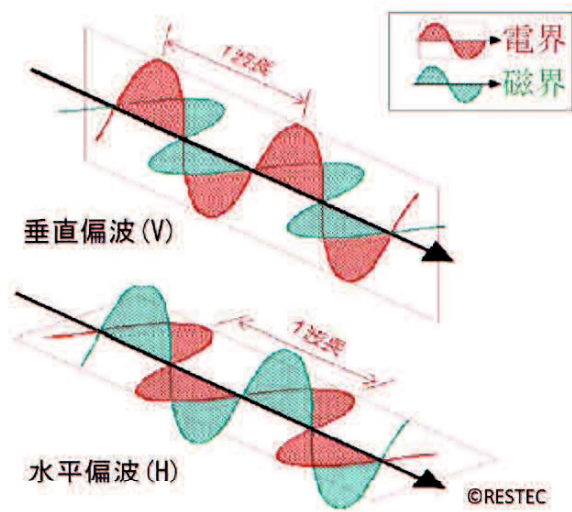


図-4.3 水平偏波と垂直偏波の概念図 12)

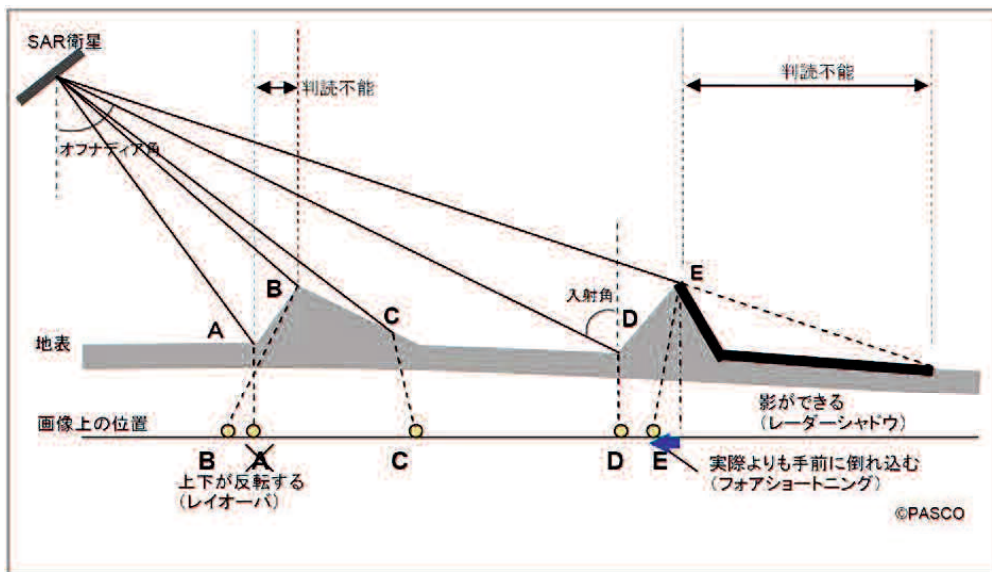
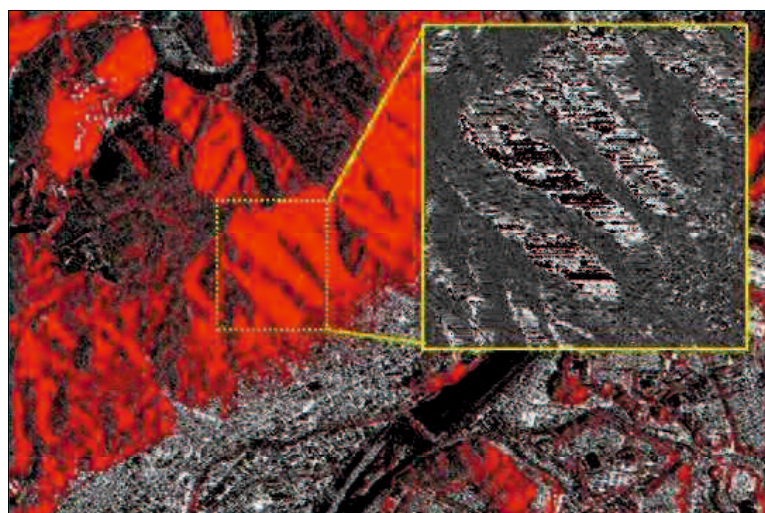


図-4.4 SAR 画像における画像の歪み 11)

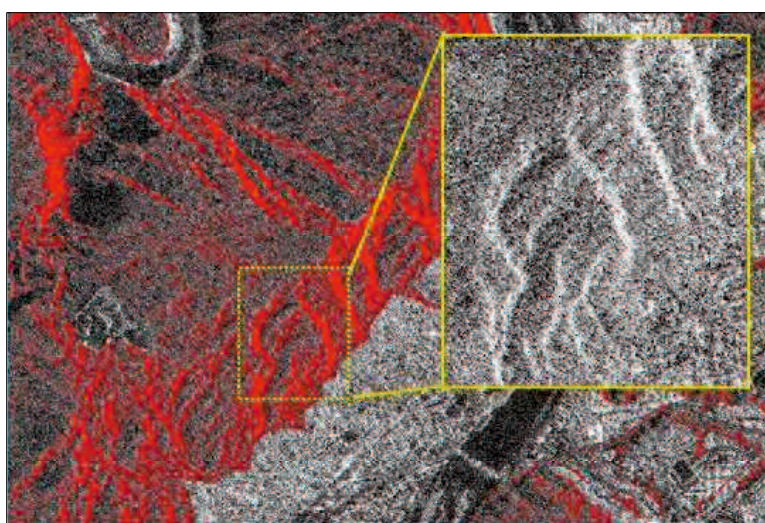
砂移動箇所として検出していることがわかる。これは、オルソ補正によって引き伸ばされた部分が土砂移動箇所として誤検出されたためである。図-4.5(a)の拡大表示した部分からわかるように、処理レベル 2.1 の画像ではオルソ補正により引き伸ばされた部分が同じ値を示す。そのため、処理レベル 2.1 の画像は地図と位置のずれがない反面、オルソ補正によって引き伸ばされた部分を誤検出してしまうため、土砂移動箇所をうまく検出することができない。

一方、処理レベル 1.5 の結果（図-4.5(b)）では山の斜面において土砂移動箇所を筋状に検出できていることがわかる。すなわち、処理レベル 1.5 の画像は画像の歪みにより地図と位置のずれがある反面、誤検出が少なく土砂移動箇所を検出することができる。

以上のことから、本章では処理レベル 1.5 のデータを使用することとした。



(a) 処理レベル 2.1 の画像を用いた場合の検出結果



(b) 処理レベル 1.5 の画像を用いた場合の検出結果

図-4.5 処理レベルの違いによる検出結果の違い

### 4.3.2 その他データ

本章では、解析をするにあたり衛星データ以外のデータとして表-4.4 に示すデータを使用する。それぞれのデータの入手元と本章における使用用途は以下の通りである。

植生調査結果<sup>15)</sup> (以下、植生図と呼ぶ) とは、自然環境局生物多様性センターによって取りまとめられた植生の分布を示す地図であり、本章では植生が分布する領域を特定する際に使用する。

地理院地図<sup>16)</sup>とは、国土地理院が公開している地形図、写真、標高、地形分類、災害情報などの情報を集約したウェブ地図であり、写真判読図 (以下、災害判読図と呼ぶ)<sup>17)</sup>とは、地理院地図の中にある土砂災害の分布を示した地図である。本章では河川などの水域や土砂移動域を特定する際に使用する。

数値標高モデル (Digital Elevation Model : DEM)<sup>13)</sup>とは、国土地理院が提供している5m メッシュの標高データであり、本章では都市域のマスク処理の際に使用する。

表-4.4 その他データ

データ	入手元	使用用途
植生調査結果 (植生図) <sup>15)</sup>	環境省自然環境局生物多様性センター	植生域の特定
地理院地図 <sup>16)</sup> 写真判読図 (災害判読図) <sup>17)</sup>	国土交通省国土地理院	水域・土砂移動域の特定
数値標高モデル (DEM) <sup>13)</sup>		都市域のマスク処理

### 4.4 解析手順

ここでは土砂災害の原因となる山の斜面における土砂移動箇所を対象に検出を試みる。

図-4.6 に本章における土砂移動箇所の検出と結果の評価までの流れを示す。

まず、式(4.1)を用いて衛星データのデジタルナンバー (Digital Number :  $DN$ ) を後方散乱係数  $\sigma^0$  に変換する<sup>18)</sup>。後方散乱係数に変換することで、異なる条件で観測された衛星データの数値を同じ基準に統一する。そのため、光学センサ画像における反射率変換の場合と同様に、後方散乱係数変換後の SAR 画像のピクセル値は同じ基準で比較することができる。

$$\sigma^0 = 10 * \log_{10} \langle DN^2 \rangle + CF \quad (4.1)$$

ここに、 $\sigma^0$  は後方散乱係数、 $DN$  は画像のデジタルナンバー、 $\langle \rangle$  はアンサンブル平均、 $CF$  は校正係数 (この場合は  $-83.0$  [dB]) である。

次に、後方散乱係数変換後の各偏波 (HH, HV, VH, VV) の画像を単偏波画像として、各

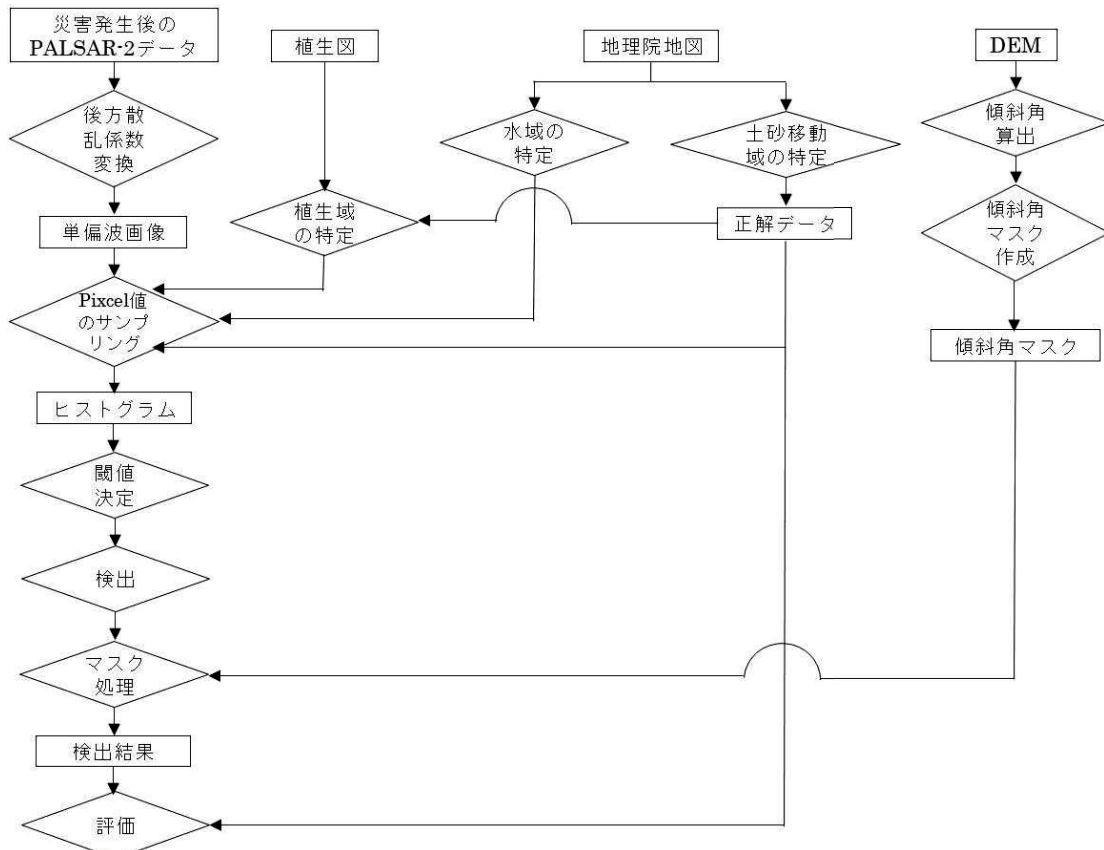


図-4.6 単偏波画像を用いた土砂移動箇所の検出と検出結果の評価までの流れ

画像における土砂移動域・植生域・水域のピクセル値をサンプリングして、ヒストグラムを作成する。ここでは、土砂移動域のサンプリングには災害判読図を参照データとして用い、植生域には植生図と災害判読図、水域には地理院地図を用いる。なお、本章で使用する処理レベル 1.5 の SAR 画像には前述したように、特有の歪みがあり地図との重ね合わせの際に位置のずれが生じる。そのため、画像の歪みを考慮して SAR 画像上の土砂移動域を特定する必要がある。SAR 画像上の土砂移動域の特定方法については、次節で説明する。

次に、各領域のヒストグラムを基に土砂移動域を検出するための閾値を求める。図-4.7 に各領域のヒストグラムをまとめたものの例を示す。ここでは、光学センサ画像を用いた場合（第 2 章、第 3 章）と同様にヒストグラムの交点、すなわち、ヒストグラムの頻度が概ね同じとなるピクセル値を閾値とする<sup>19)</sup>。

ヒストグラムより求めた閾値を用いて土砂移動箇所を検出する。また、ここでの検出結果は斜面における土砂移動域だけでなく平地の裸地や都市域などの誤検出を含む。そのため、これら平地における誤検出を除去するために、傾斜角マスク処理を施す。マスク処理に使用する傾斜角データは国土地理院が提供している 5m メッシュの DEM データを基に作成する。また、過去の災害事例では、傾斜が 15 度以上になると土砂災害の発生件数が多くなり、30 度から 60 度程度までが最も多く、10 度未満のところはほとんど発生しないことが明ら



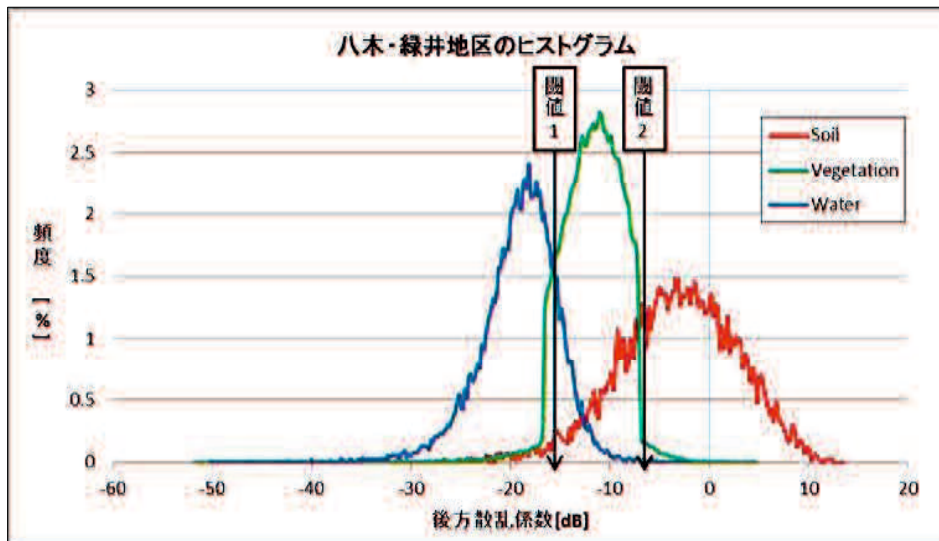


図-4.7 土砂移動域・植生域・水域のヒストグラムより閾値を求める例

かにされている<sup>20)</sup>。そこで、ここではマスクする領域を傾斜角が10度未満の領域とする。

最後に、平地の誤検出箇所を除去した検出結果の精度評価を行う。ここでは、災害判読図を基に作成した正解データ（実際の土砂移動箇所のデータ）の都合上、面積を基準とした精度評価を行うことができない。そこで、精度評価は検出結果と正解データを目視で比較することで行うこととする。具体的には、実際の土砂移動箇所の面積を5割以上検出できた場合を検出成功、3割以上5割未満を検出できた場合を部分検出成功、3割未満しか検出できなかった場合を検出失敗と判断して、実際の土砂移動箇所に対して検出成功と部分検出成功が何箇所あるかで精度評価を行う。

#### 4.5 SAR画像上における土砂移動箇所の特定

SAR画像にはフォアショートニングやレイオーバーといった観測方法に起因する特有の歪みが生じるため、地図とSAR画像において土砂移動箇所の位置にずれが生じる。そこでここでは、以下に説明する手順によりSAR画像における土砂移動箇所の位置を特定する<sup>21)</sup>。

##### 4.5.1 フォアショートニングによる倒れ込み

フォアショートニングによる倒れ込みは、オフナディア角と対象物の高さ（山の場合は標高）に依存する。そこで、これらを基にフォアショートニングによる位置のずれ（倒れ込み量）を求める。

図-4.8に地表面が平面であると仮定した場合の対象物の高さ $h$ と倒れ込み量 $d$ の関係図を示す。また、図-4.9に地表面が曲面である場合の入射角 $\alpha$ とオフナディア角 $\theta$ の関係図を示す。

まず、地表面が平面である場合の倒れ込み量を求める。図-4.8において、高さ $h$ と倒れ込み量の関係式は式(4.2)で表される。なお、ここでは地表面が平面であるため、その2本の垂線は平行となり入射角 $\alpha$ とオフナディア角 $\theta$ は等しい。

$$L = \frac{h}{\tan \alpha} \quad (4.2)$$

ここに、 $L$ はフォアショートニングによる倒れ込み量[m]、 $h$ は対象物の高さ[m]、 $\alpha$ は入射角[deg]である。フォアショートニングの影響により、点Aは点A'の場所に投影され、実際の倒れ込み量は $L'$  ( $\Delta L + L$ )となる。しかし、 $\Delta L$ は $L$ に対してはるかに小さいため、ここでは近似的に倒れ込み量を $L$ とすることができる。

また、式(4.2)は式(4.3)で表すことができる。

$$L = \frac{h \sqrt{1 - (\sin \alpha)^2}}{\sin \alpha} \quad (4.3)$$

次に、地表面が曲面である場合の倒れ込み量を求める。図-4.9において、得られる入射角 $\alpha$ とオフナディア角 $\theta$ の関係式は式(4.4)と式(4.5)で表される。

$$X = (H + R) * \sin \theta \quad (4.4)$$

$$X = R * \sin \alpha \quad (4.5)$$

ここに、 $X$ は地球の中心から衛星と地球の中心とが直角をなす直線までの距離[km]、 $H$ は衛星の高度[km]、 $R$ は地球の半径[km]、 $\theta$ はオフナディア角[deg]である。なお、ここでは地球を楕円体ではなく球体として考える。

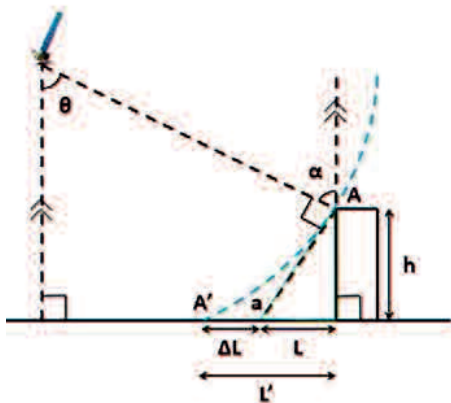


図-4.8 地表面が平面である場合のフォアショートニングによる倒れ込み量の関係

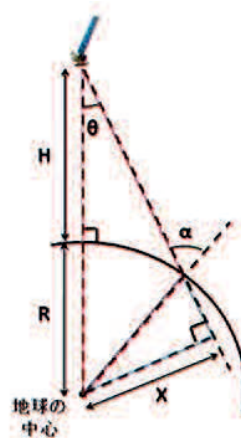


図-4.9 地表面が曲面である場合の入射角 $\alpha$ とオフナディア角 $\theta$ の関係



式(4.4)と式(4.5)より、入射角  $\alpha$  とオフナディア角  $\theta$  の関係は式(4.6)で表される。

$$\sin \alpha = \left( 1 + \frac{H}{R} \right) \sin \theta \quad (4.6)$$

以上より、地表が曲面である場合の対象物の高さ  $h$  と倒れ込み量  $L$  の関係は、式(4.3)に式(4.6)を代入することにより、式(4.7)で表すことができる。

$$L = h \sqrt{\frac{1}{\left( 1 + \frac{H}{R} \right)^2 * (\sin \theta)^2} - 1} \quad (4.7)$$

#### 4.5.2 フォアショートニングによる倒れ込みを考慮した SAR 画像上の土砂移動箇所の特定

ここでは、前項で求めた倒れ込み量を基に、処理レベル 1.5 の SAR 画像における土砂移動箇所の位置を特定する。図-4.10 に位置特定の例を示し、以下にその手順について説明する。なお、図中の番号は以下の手順と対応する。

(手順 i) : 災害判読図を基に実際に土砂移動が発生した場所の源頭部や合流部等に基準となるポイント (図-4.10(a)における黒色の×印) を設け、各ポイントの地理座標と標高値を地理院地図より求める。なお、ここで使用する座標は世界測地系 (JGD2011)<sup>13)</sup> で定義されたものであり衛星画像の座標として用いられる WGS84 とのずれは 1cm 以下である<sup>22)</sup>。また、標高値は航空レーザー測量によって算出された 5m メッシュのものであり、精度は 0.3m 以内である<sup>13)</sup>。

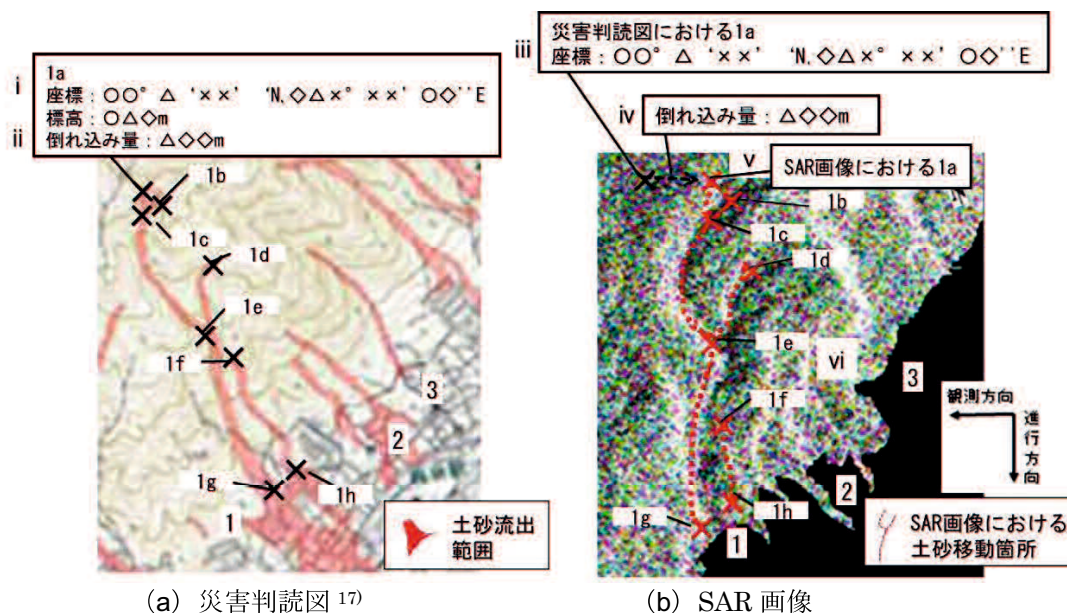


図-4.10 SAR 画像上における土砂移動箇所の特定方法<sup>21)</sup>

(手順 ii) : 式(4.7)から各ポイントの倒れ込み量を算出する。

(手順 iii) : SAR 画像における各ポイントの位置を地理座標から求め、倒れ込みを考慮する前のポイントとする (図-4.10(b)における黒色の×印)。

(手順 iv) : 手順 iii において求めた各ポイントの位置を基準として、手順 ii で求めた倒れ込み量だけ衛星の観測方向 (ここでは Descending 右向き観測データのため画像右方向) にポイントを移動させる。

(手順 v) : 移動後の各ポイントを倒れ込みを考慮した後の基準ポイントとする (図-4.10(b)における赤色の×印)。

最後に、倒れ込み考慮後の各基準ポイントを線分 (赤色の点線) で結び、SAR 画像における土砂移動箇所とする。

#### 4.6 検出結果と考察

ここでは、平成 26 年 8 月豪雨において特に被害が大きかった安佐南区の八木・緑井地区と安佐北区の可部東地区の 2 地区を解析対象地区として、八木・緑井地区では 19 箇所、可部東地区では 12 箇所の土砂移動箇所を対象に検出を行う。図-4.11 に本章で対象とする解析対象地区の位置と範囲を示す。なお、ここでは正解データの都合上、八木・緑井地区と可部東地区のみを対象に検出を行う。



図-4.11 平成 26 年 8 月豪雨における解析対象地区の位置と範囲

#### 4.6.1 八木・緑井地区を対象とした場合の検出結果と考察

はじめに、八木・緑井地区を対象とした土砂移動箇所の検出結果について説明する。

八木・緑井地区の HH, HV, VH, VV 偏波画像における土砂移動域・植生域・水域のヒストグラムを図-4.12 から図-4.15 にそれぞれ示す。また、それぞれのヒストグラムより求めた閾値を表-4.5 にまとめて示す。

それぞれの図から、SAR 画像における各領域のヒストグラムは光学センサ画像の場合と異なり、各領域のピーク値は異なるがそれぞれのヒストグラムの重なりが大きく、光学センサ画像の場合と比べてヒストグラムが分離していないことがわかった。すなわち、異なる領域にもかかわらず同じ値を示すピクセルが多く存在することがわかった。

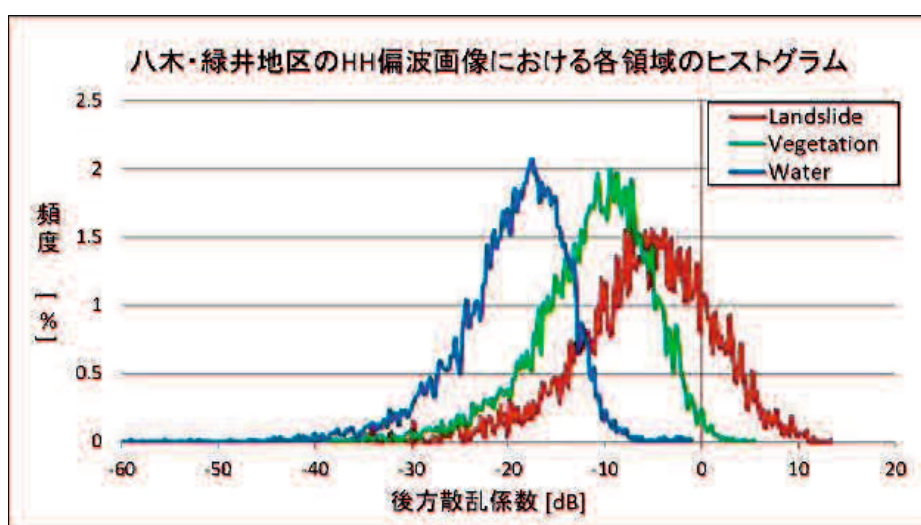


図-4.12 八木・緑井地区の HH 偏波画像における各領域のヒストグラム

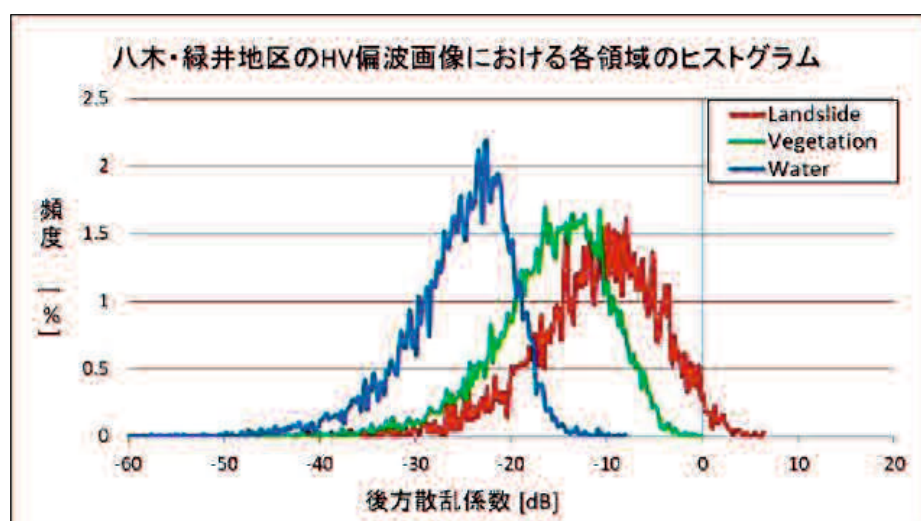


図-4.13 八木・緑井地区の HV 偏波画像における各領域のヒストグラム

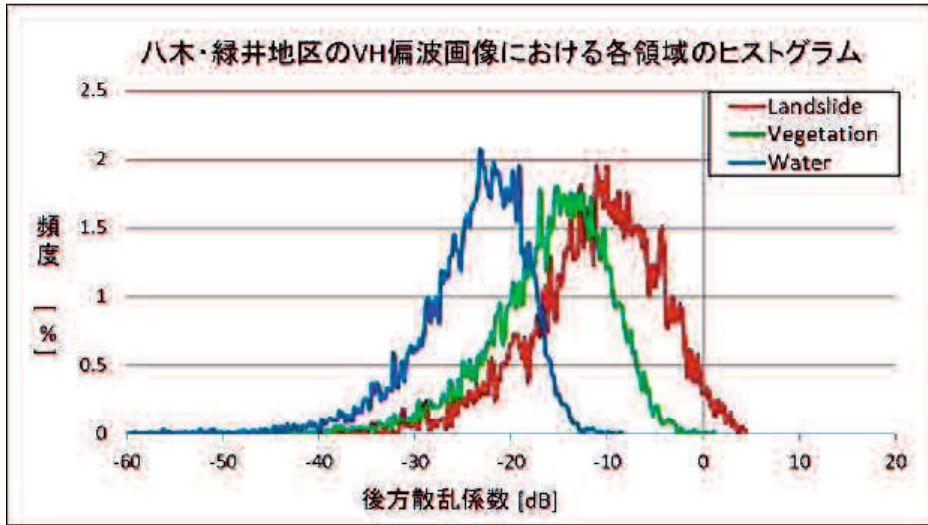


図-4.14 八木・緑井地区のVH偏波画像における各領域のヒストグラム

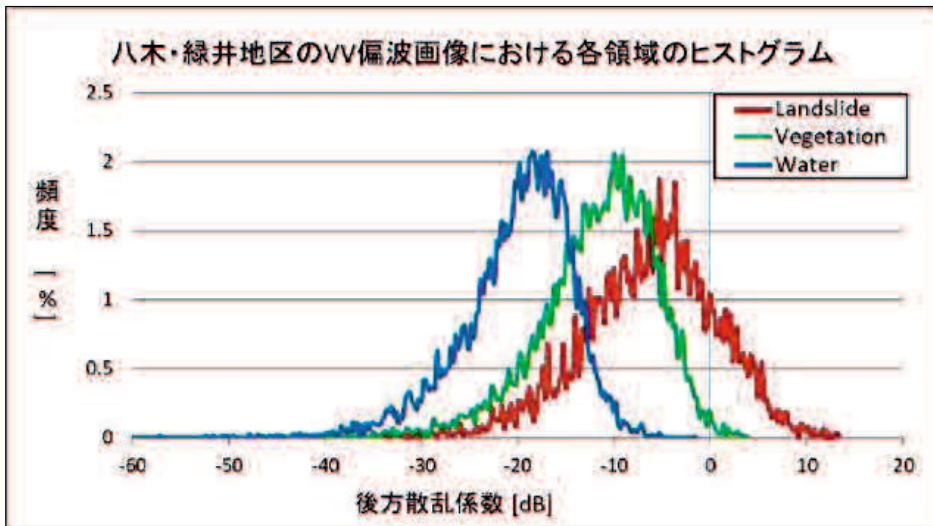


図-4.15 八木・緑井地区のVV偏波画像における各領域のヒストグラム

表-4.5 八木・緑井地区の各偏波画像における閾値

偏波	HH	HV	VH	VV
閾値	-6.2~13.4	-10.6~6.3	-12.9~4.4	-6.0~13.4

また、光学センサ画像の場合とは異なり、全ての偏波画像において各領域は土砂移動域、植生域、水域の順番で大きい値を示すことがわかった。

次に、表-4.5の閾値を用いた検出結果を図-4.16から図-4.19にそれぞれ示す。図の黄色と青色の線分は正解とする実際の土砂移動箇所、赤色で表示した領域は土砂移動箇所として検出した結果を示す。なお、画像はDescending右向き観測の画像、すなわち、画像の右側から左方向を観測した画像であり、黄色の線分は衛星から観て手前側の斜面にある実



際の土砂移動箇所、青色の線分は奥側の斜面にある実際の土砂移動箇所を示す。また、検出結果は傾斜角が 10 度未満の領域をマスク処理することで平地の誤検出を除去したものである。

表-4.6 にそれぞれの偏波画像を用いた検出結果をまとめて示す。表の斜面の向きとは、衛星の観測方向を 0 度として時計回りを正、反時計回りを負の数値で表した各土砂移動箇所の平均的な斜面の向きである。また、表の○は検出成功、△は部分検出成功、×は検出失敗を意味する。

全ての偏波画像の検出結果において、衛星から観て手前側の斜面と奥側の斜面で大きな違いがみられた。具体的には、手前側の土砂移動箇所は全ての偏波画像において概ね検出することができたが、奥側の土砂移動箇所は HH 偏波画像において部分的に検出できたが、その他の偏波画像においては土砂移動箇所を検出することができなかった。

ここで、林らによる既往研究では、土砂移動箇所の面積が小さい場合には衛星からの傾斜方向が遠ざかるにつれて検出精度が低下する傾向があることが報告されており<sup>2)</sup>、表-4.6 から、ここでは概ね±90 度を境として検出精度に違いが現れることがわかった。しかし、各土砂移動箇所の検出精度と面積の大きさの関係性はみられなかった。以上のことより、土砂移動箇所の検出精度には土砂移動箇所の面積の大きさより斜面の向きが大きく影響していると考えられる。そのため、土砂移動箇所の検出精度と斜面の向きとの関係性については今後の研究において更なる検討を行う必要がある。

また、HH 偏波画像の検出結果では、実際には土砂移動が発生していない場所における誤検出が多く、土砂移動箇所のみを検出することはできなかった。すなわち、土砂移動箇所の見落としは少ないが誤検出が多い検出結果であった。この原因として、光学センサ画像の場合と比べ SAR の単偏波画像では土砂移動域・植生域・水域それぞれのヒストグラムの重なりが大きく、特に土砂移動域と植生域のヒストグラムがほとんど同じピクセル値であることが考えられる。しかし、これは各領域における後方散乱特性だけでなく、フォアショートニングなど画像の歪みによる影響もあると考えられる。そのため、災害発生後のみの単偏波画像のピクセル値だけではこれらの誤検出を低減することは困難だといえる。また、各領域の後方散乱特性について更なる検討を行うためには、今後の研究においてフォアショートニングなどの影響を除去した場合について検討を行う必要がある。

HH, HV, VH, VV 偏波画像を用いた検出では、HH 偏波画像を用いた場合が最も土砂移動箇所を見落としが少なく検出することができ、19 箇所中 18 箇所の土砂移動箇所を検出することができた。一方、VV 偏波画像を用いた場合が最も土砂移動箇所の見落としが多く、検出できたのは 18 箇所中 13 箇所であった。



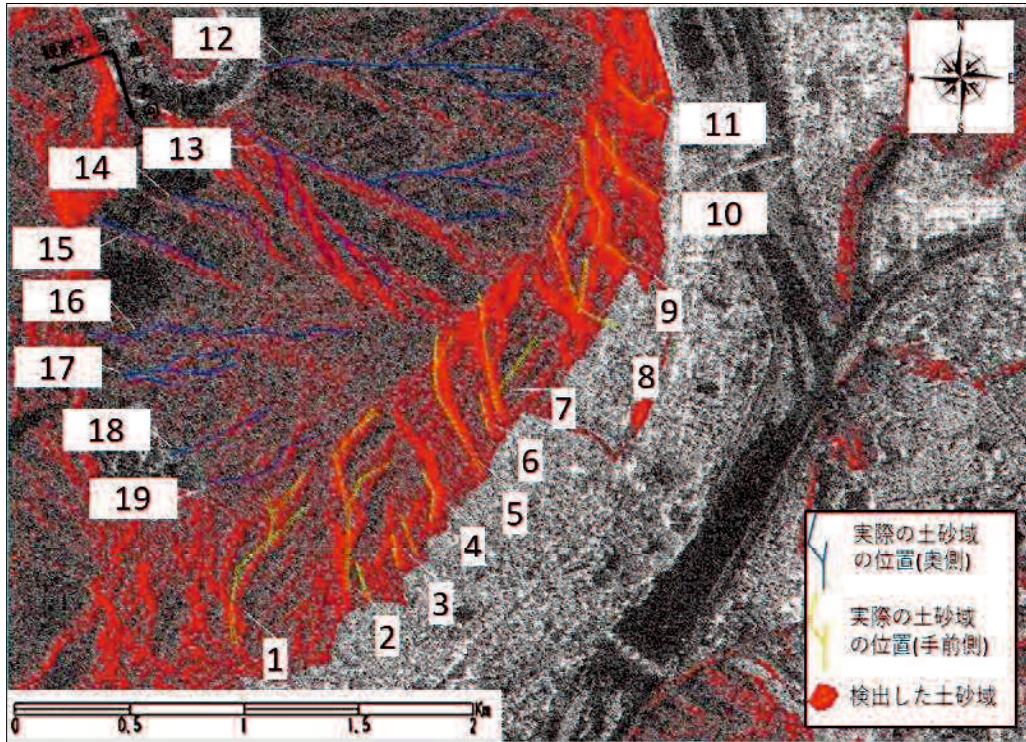


図-4.16 八木・緑井地区の HH 偏波画像を用いた検出結果

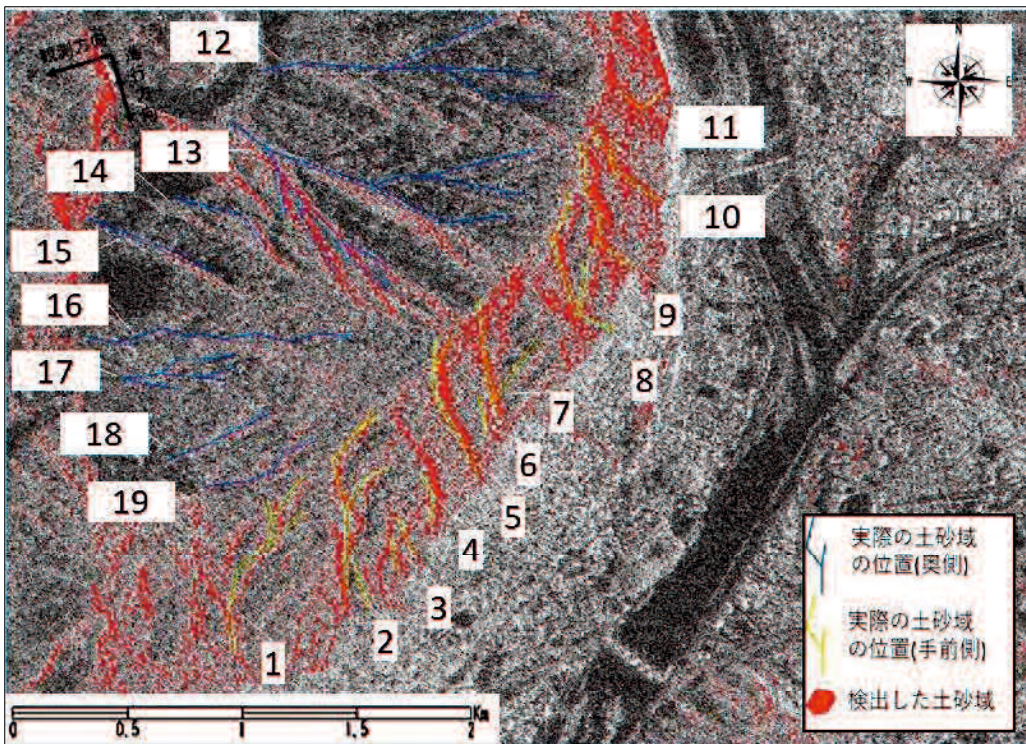


図-4.17 八木・緑井地区の HV 偏波画像を用いた検出結果



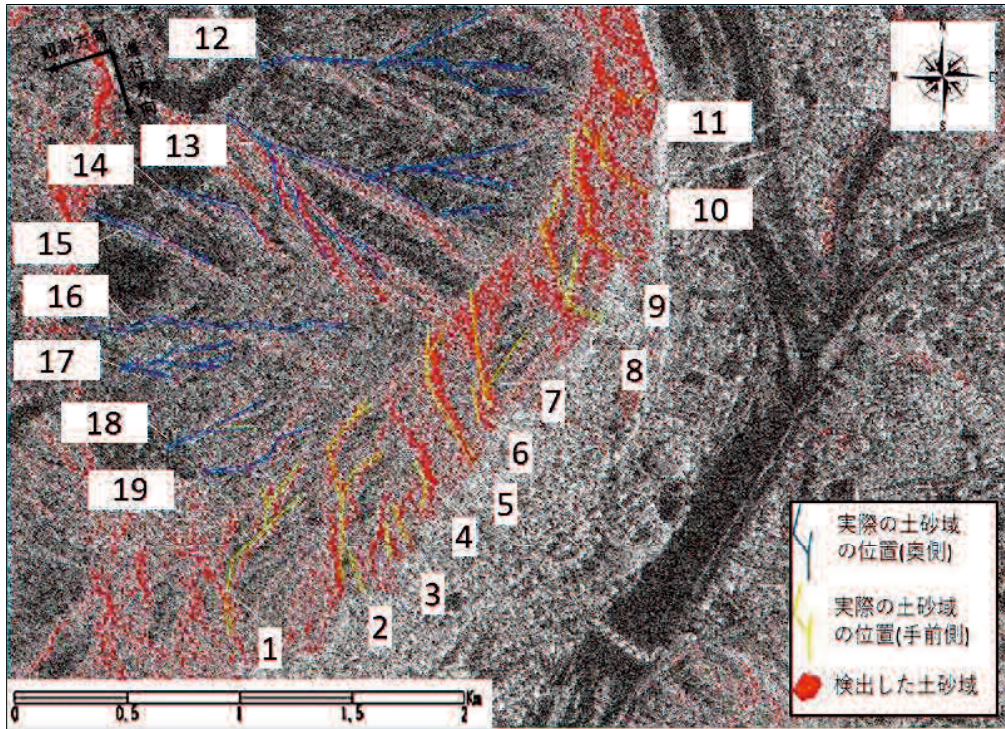


図-4.18 八木・緑井地区のVH偏波画像を用いた検出結果

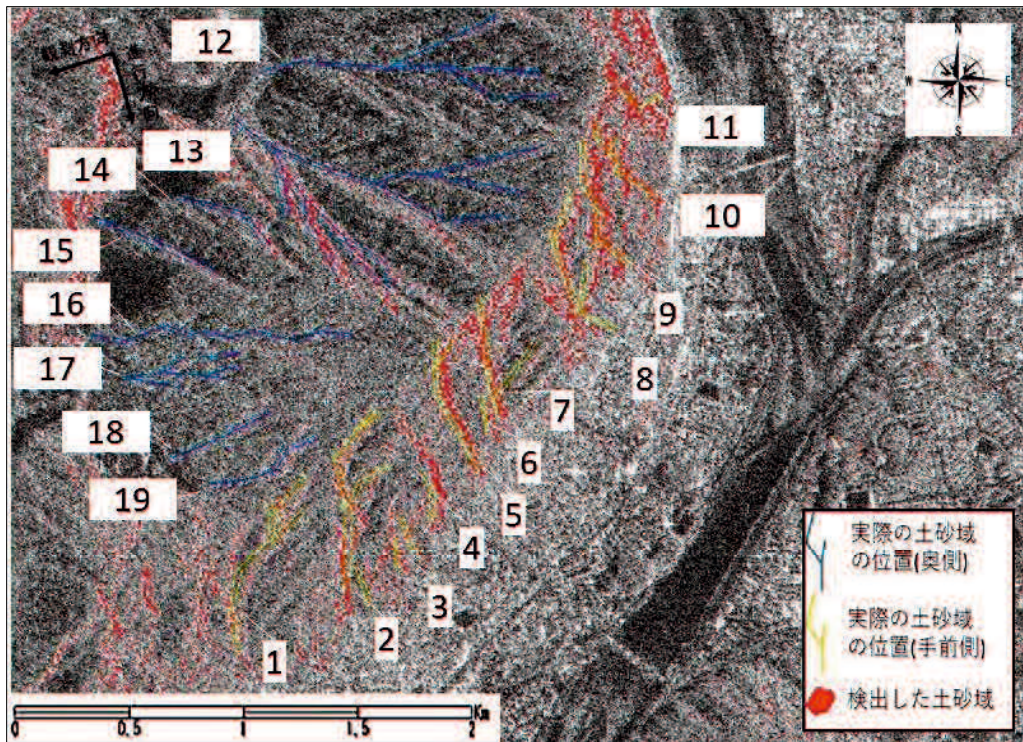


図-4.19 八木・緑井地区のVV偏波画像を用いた検出結果

表-4.6 八木・緑井地区における各単偏波画像の検出結果

番号	面積[m <sup>2</sup> ]	斜面の向き[度]	HH 偏波	HV 偏波	VH 偏波	VV 偏波
1	22,104	64.6	○	○	○	○
2	27,288	85.6	○	○	○	○
3	17,721	51.6	○	○	○	○
4	7,261	33.6	○	○	○	○
5	25,218	42.6	○	○	○	○
6	3,141	33.6	○	○	○	○
7	30,942	52.6	△	△	△	△
8	27,486	41.6	△	△	△	△
9	15,966	22.6	○	○	○	○
10	15,705	12.6	○	○	○	○
11	13,689	2.6	○	○	○	○
12	34,587	-171.4	×	×	×	×
13	90,009	136.6	△	△	△	△
14	4,401	-164.4	△	△	△	△
15	5,922	167.6	○	△	△	×
16	16,821	171.6	△	×	×	×
17	15,066	-176.4	△	×	×	×
18	5,076	-179.4	△	×	×	×
19	7,821	167.6	○	△	△	×

#### 4.6.2 可部東地区を対象とした場合の検出結果と考察

次に、可部東地区における検出結果について説明する。

ここで、光学センサ画像を用いた場合の結果ではあるが、1枚の画像中の土砂移動箇所は地区が異なる場合でも同じ閾値で検出できることが先行研究の結果より得られている<sup>19)</sup>。そこで、ここでは、八木・緑井地区で求めた表-4.5の閾値を用いて可部東地区における土砂移動箇所の検出を試みる。

各偏波画像の検出結果を図-4.20から図-4.23にそれぞれ示す。また、表-4.7にそれぞれの偏波画像の検出結果と各土砂移動箇所の詳細をまとめて示す。

可部東地区では、八木・緑井地区の場合とは異なり、斜面の向きに関係なく全ての偏波画像において土砂移動箇所を概ね検出することができた。しかし、八木・緑井地区の場合と同様に、検出結果には誤検出が多く、それぞれの土砂移動箇所のみを検出することはできなかった。可部東地区の検出結果において、検出精度と斜面の向きに関係性がみられなかった原因として、可部東地区の地形が考えられる。鴻野らによる既往研究では、尾根や谷の高低差が大きい複雑な地形の場所では検出が困難なことが報告されている<sup>23)</sup>。ここで、八木・緑



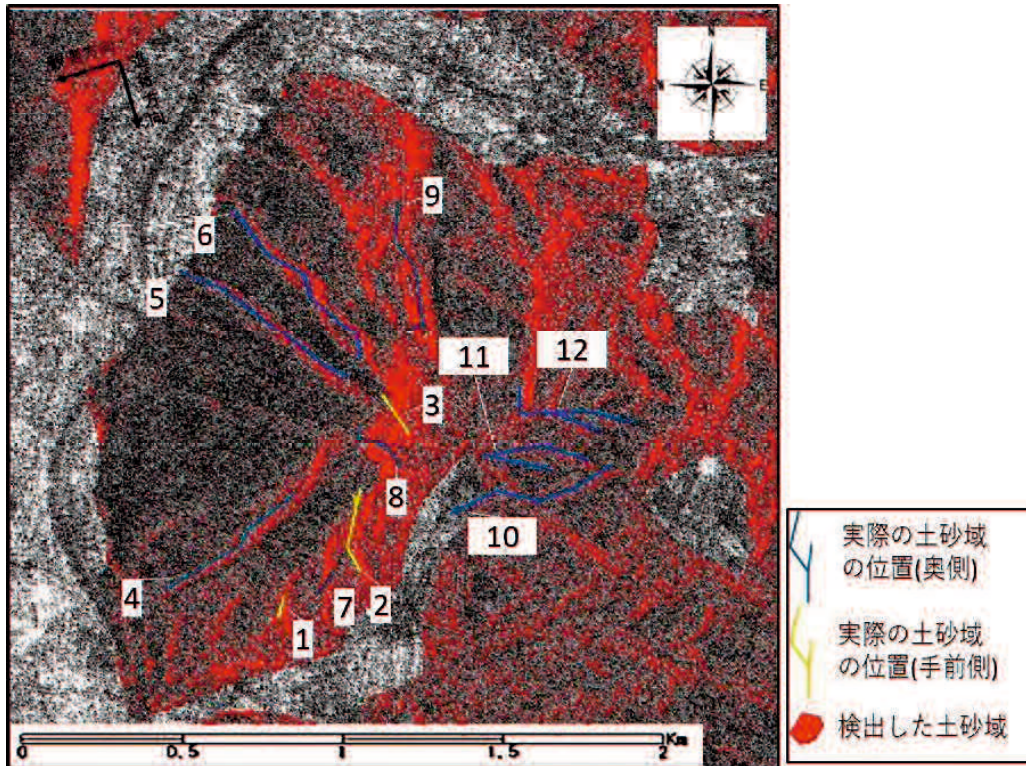


図-4.20 可部東地区の HH 偏波画像を用いた検出結果

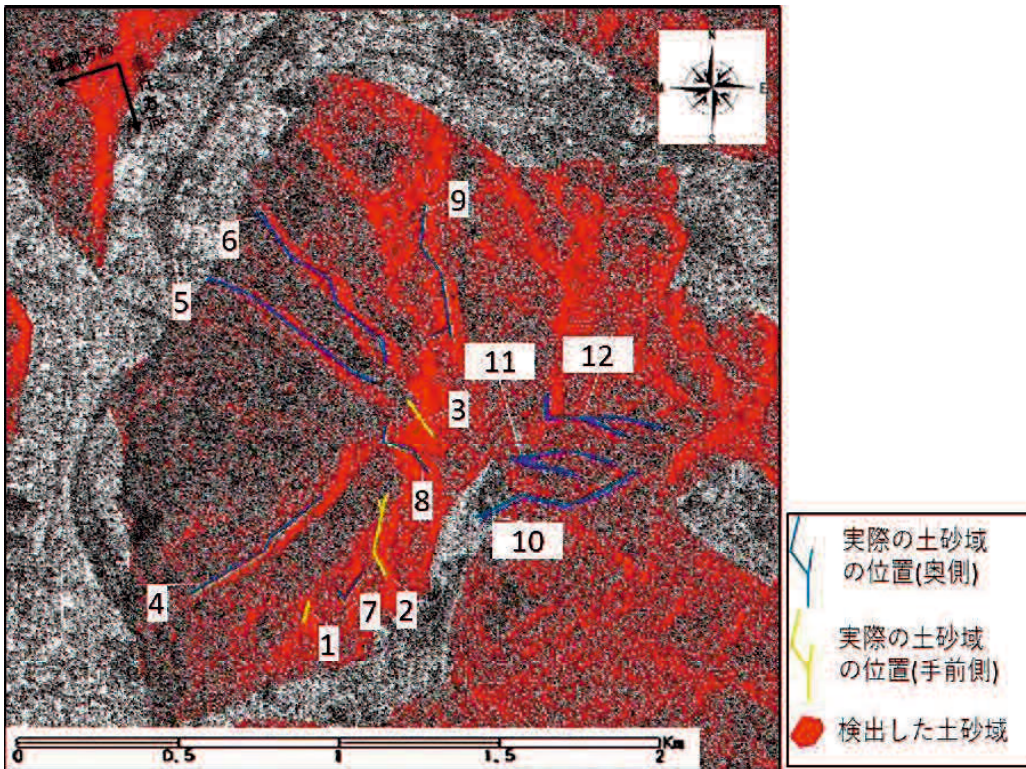


図-4.21 可部東地区の HV 偏波画像を用いた検出結果



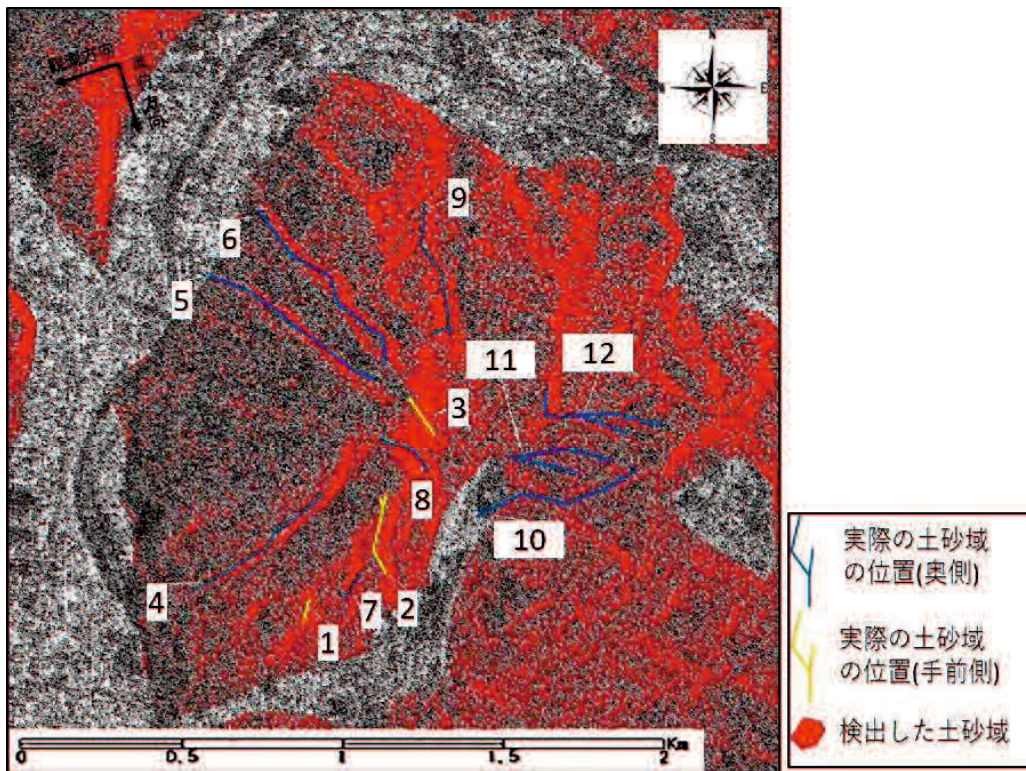


図-4.22 可部東地区のVH偏波画像を用いた検出結果

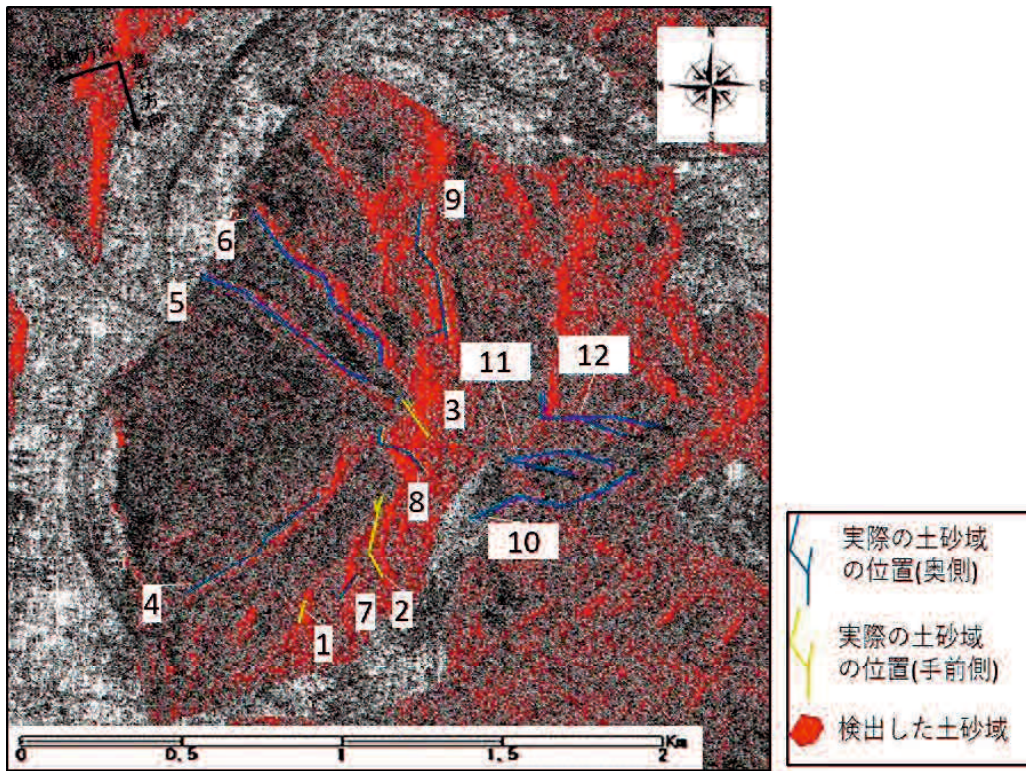


図-4.23 可部東地区のVV偏波画像を用いた検出結果



表-4.7 可部東地区における各単偏波画像の検出結果

番号	面積[m <sup>2</sup> ]	斜面の向き[度]	HH 偏波	HV 偏波	VH 偏波	VV 偏波
1	1,917	84.6	○	○	○	○
2	29,961	32.6	○	○	○	○
3	8,856	39.6	○	○	○	○
4	13,545	151.6	○	○	○	○
5	14,463	139.6	○	○	○	○
6	24,030	100.6	○	○	○	○
7	35,55	98.6	○	○	○	○
8	11,268	125.6	○	○	○	○
9	7,261	104.6	○	○	○	○
10	8,775	171.6	○	○	○	×
11	25,677	143.6	△	○	△	×
12	12,006	149.6	○	○	○	×

井地区では手前側や奥側において斜面の向きが概ね一定であるのに対して、可部東地区では斜面の向きが様々な向きを向いており一定ではない。そのため、斜面の向きの複雑さが八木・緑井地区と可部東地区における検出結果の違いの原因だと考えられる。しかし、ここでは準備できた正解データの都合上、十分なサンプル数で検討することができなかつたため、この点については今後の研究においてサンプル数を増やして検討を行う必要がある。

また、可部東地区における検出結果から、SAR 画像を用いた場合においても、同じ閾値を用いて異なる地区の土砂移動箇所を検出できることがわかった。ただし、ここでの閾値は平成 26 年 8 月豪雨を対象とした場合に得られたものであり、閾値については今後の研究において更なる検討を行う必要がある。

#### 4.7 結語

本章では、条件の良い災害発生前画像が得られない場合を想定して、平成 26 年 8 月豪雨を対象に災害発生後の PALSAR-2 単偏波 (HH, HV, VH, VV) 画像を用いて土砂移動箇所の検出を試みた。

その結果、以下に示す知見を得ることができた。

①各偏波画像における土砂移動域・植生域・水域のヒストグラムは、光学センサ画像の場合と比べて各領域のヒストグラム同士の重なりが大きく、異なる領域にもかかわらず同じ値を示すピクセルが多く存在することがわかった。また、全ての偏波画像において、各領域は土砂移動域、植生域、水域の順で大きい値を示し、各偏波画像の違いはそれぞれの領域が

示す値の違いだけであることがわかった。

②八木・緑井地区を対象とした場合の結果から、八木・緑井地区では土砂移動箇所を検出結果は衛星から観て手前側の斜面と奥側の斜面で異なり、手前側の土砂移動箇所は概ね検出できたが奥側の土砂移動箇所はあまり検出することができず、その境は±90度であることがわかった。また、八木・緑井地区では HH 偏波画像を用いた場合が最も土砂移動箇所を検出することができ、閾値を−6.2~13.4 と設定することで 19 箇所中 18 箇所の土砂移動箇所を検出することができた。

③可部東地区を対象とした場合の結果から、可部東地区では斜面の向きに関係なく各偏波において土砂移動箇所を検出することができた。また、偏波による検出結果の違いは見られなかった。この原因としては可部東地区における複雑な地形が考えられ、今後の研究において検討を行う必要がある。

④また、可部東地区を対象とした場合の結果から、光学センサの場合と同様に、SAR 画像を用いた場合でも 1 枚の画像中であれば同じ閾値を用いて異なる地区の土砂移動箇所を検出できることがわかった。ただし、ここでの閾値は平成 26 年 8 月豪雨を対象とした場合に得られたものであり、閾値については今後の研究において更なる検討を行う必要がある。

## 参考文献

- 1) 大内和夫：リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎[第2版]，東京電機大学出版局出版，2009.
- 2) 林真一郎，水野正樹，小山内信智，西真佐人，清水孝一，中川和男，松本定一：ALOS(だいち)合成開口レーダーを用いた崩壊地抽出手法と適用性，砂防学会誌，第65巻，第4号，pp.3-14，2012.
- 3) Matsuoka, M. and Yamazaki, F. : Use of Satellite SAR Intensity Imagery for Detecting Building Areas Damaged due to Earthquakes, Earthquake Spectra, Vol.20, No.3, pp.975-994, 2004.
- 4) CAO Yun-ganga, YAN Li-juanb, ZHENG Zezhonga :EXTRACTION OF INFORMATION ON GEOLOGY HAZARD FROM MULTIPOLARIZATION SAR IMAGES, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXVII. Part B4p, pp.1529-1532, 2008.
- 5) 渡邊学，米澤千夏，園田潤，島田政信：L-band SAR (PALSAR-2) を用いた，“広域データ”からの土砂災害域検出，日本リモートセンシング学会誌，第37巻，第1号，pp.21-26，2017.
- 6) M. Shimada, M. Watanabe, N. Kawano, M. Ohki, T. Motooka, W. Wada : Detecting mountainous landslides by SAR polarimetry: A comparative study using Pi-SAR-L2 and X band SARs. Trans. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci., Aerosp. Technol. Jpn. Vol. 12, No.29, pp.9-15, 2014.
- 7) 矢来博司，中川弘之，飛田幹男，村上亮，藤原智：RADARSAT/SAR データ干渉処理による地殻変動検出の試みー2000年鳥取県西部地震の地殻変動ー，地震第2輯，第54巻，第4号，pp.535-546，2002.
- 8) 公益社団法人土木学会：平成26年8月広島豪雨災害調査報告書，2015.
- 9) 宇宙航空研究開発機構第一宇宙技術部門地球観測研究センター：ALOS プロジェクト，ALOS-2 の概要，<https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/about/joverview.htm>.
- 10) 国土交通省中国地方整備局太田川河事務所：平成26年8月20日豪雨広島土砂災害，2014.
- 11) 水野正樹，神山嬢子，江川真史，佐藤匠，蒲原潤一：2偏波 SAR 画像による大規模崩壊及び河道閉塞箇所 の 範 読 調 査 手 法 ( 案 ) ， 国 土 技 術 政 策 総 合 研 究 所 資 料 ， 第 791 号 ， 2014.
- 12) 一般財団法人リモート・センシング技術センター：リモートセンシング技術研修テキスト，SAR の基本原理，S01-13，2014.
- 13) 国土交通省国土地理院：地理院地図で得られる値等について，<https://maps.gsi.go.jp/help/how-touse.html>.
- 14) 一般社団法人日本リモートセンシング学会：基礎からわかるリモートセンシング，理工図書株式会社出版，2011.
- 15) 環境省自然環境局：1/2.5万現存植生図，<http://www.vegetation.biodic.go.jp/>.
- 16) 国土交通省国土地理院：地理院地図，[https://maps.gsi.go.jp/#12/32.783522/131.139679/&ls=\\_ort&disp=1&lcd=\\_ort&vs=c1j0h0k0l0u0t0z0r0s0f1&d=vl](https://maps.gsi.go.jp/#12/32.783522/131.139679/&ls=_ort&disp=1&lcd=_ort&vs=c1j0h0k0l0u0t0z0r0s0f1&d=vl).
- 17) 国土交通省国土地理院：地理院地図，写真判読図(8/28・30・31垂直写真)，[http://maps.gsi.go.jp/?ll=34.515044,132.497005&z=13&base=std&ls=hisai1408ooame\\_hiroshima3&cd=f2%2Ff2\\_2%2Ff2\\_2\\_0&vs=c1j0l0u0&d=l#13/34.515044/132.497005/&base=std&ls=std%7Chisai1408ooame\\_hiroshima3&disp=11&vs=c1j0h0k0l0u0t0z0r0s0f1&d=l](http://maps.gsi.go.jp/?ll=34.515044,132.497005&z=13&base=std&ls=hisai1408ooame_hiroshima3&cd=f2%2Ff2_2%2Ff2_2_0&vs=c1j0l0u0&d=l#13/34.515044/132.497005/&base=std&ls=std%7Chisai1408ooame_hiroshima3&disp=11&vs=c1j0h0k0l0u0t0z0r0s0f1&d=l).
- 18) M. Shimada, O. Isoguchi, T. Tadono, and K. Isono, : PALSAR Radiometric and Geometric Calibration, IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol.47, No.12, pp.3915-3932, 2009.
- 19) 江口毅，三浦房紀：衛星リモートセンシングを用いた地震および豪雨による斜面崩壊発生箇所の早期発見手法，土木学会論文集 F6 (安全問題)，第72巻，第1号，pp.11-20，2016.
- 20) 中村浩之，上屋智，井上公夫，石川芳治(編)：地震砂防，古今書院，2000.
- 21) 江口毅，三浦房紀：災害発生後のみのALOS-2/PALSAR-2画像による斜面崩壊域の早期発見手法，土木学会論文集 F6 (安全問題)，第74巻，第1号，pp.1-10，2018.
- 22) 国土交通省国土地理院：世界測地系移行に関する質問集(Q&A)，<http://www.gsi.go.jp/>

LAW/ G2000-g2000faq-1.htm#qa1-15.

- 23) 鴻野智崇, 井上雄太, 伊藤哲司, 桑原祐史: SAR と光学センサ利用によるネパール国北部山岳地帯を対象とした斜面災害域抽出効果, 環境情報科学論文集, 第 31 巻, pp.241-246, 2017.

## 5 災害発生後の複数偏波画像を用いた土砂災害検出手法

### 5.1 緒言

第4章では、災害発生後の単偏波画像における土砂移動域・植生域・水域のヒストグラム  
の交点を閾値とすることで、ある条件のもとで土砂移動箇所を検出できることを示すこ  
うができた。しかし、検出結果には誤検出が多く、土砂移動域の形状や位置を把握するこ  
うが困難であった。

そこで、本章では、4種類ある偏波（HH, HV, VH, VV）を組み合わせた新しい指標を考  
案し、このようにして作成した画像を用いて土砂移動箇所の検出を試みる。具体的には、2  
偏波を組み合わせた2偏波演算画像と4偏波を組み合わせた4偏波演算画像を用いて、平成26  
年8月豪雨<sup>1)</sup>において発生した土砂災害を対象に検出を試みる。

### 5.2 解析対象と使用データ

本章では、第4章と同様に平成26年8月豪雨によって発生した土砂災害を対象として、  
ALOS-2/PALSAR-2<sup>2)</sup>データを用いて解析を行う。また、衛星データ以外のデータとして、  
自然環境局生物多様性センターによって取りまとめられた植生調査結果<sup>3)</sup>（以下、植生図と  
呼ぶ）、国土地理院が公開している地理院地図<sup>4)</sup>、写真判読図<sup>5)</sup>（以下、災害判読図と呼ぶ）  
および数値標高モデル（Digital Elevation Model : DEM）<sup>6)</sup>を使用する。本章で使用するデ  
ータを表-5.1と表-5.2に再掲する。したがって、ここでは対象とする災害事例および各デー  
タの詳細については説明を割愛する。

表-5.1 使用する ALOS-2/PALSAR-2 データ

衛星/センサ	ALOS-2/PALSAR-2
観測日	2014年8月20日 (発災直後)
観測条件	軌道 : Descending 観測向き : 右向き
偏波	HH, HV, VH, VV
分解能	3m
処理レベル	1.5



表-5.2 その他データ

データ	入手元	使用用途
植生調査結果（植生図） <sup>3)</sup>	環境省自然環境局生物多様性センター	植生域の特定
地理院地図 <sup>4)</sup> 写真判読図（災害判読図） <sup>5)</sup>	国土交通省国土地理院	水域・土砂移動域の特定
数値標高モデル（DEM） <sup>6)</sup>		都市域のマスク処理

### 5.3 2偏波演算画像と4偏波演算画像の検討

#### 5.3.1 2偏波演算画像の検討

土砂災害の検出に関する既往研究において、例えば、水野らによる既往研究では、裸地では HH および VV 偏波の後方散乱が卓越する<sup>7)</sup>と報告されているのに対して、渡邊らによる既往研究では、土砂災害域は HV 偏波後方散乱係数で明るくなる<sup>8)</sup>と報告されている。また、林らや鴻野らによる既往研究では、土砂災害の検出の指標として NDPI (Normalized Difference Polarization Index)<sup>9)</sup>が用いられているが、NDPI を用いた検出では土砂災害の検出が困難であることが報告されている<sup>10,11)</sup>。すなわち、土砂災害の検出に有効な偏波や指標については明らかにされていない。

そこで、ここでは、4種類ある偏波 (HH, HV, VH, VV) から A, B: 2 偏波を選び、式(5.1)を用いて 2 偏波演算画像を 12 通り ( ${}_4P_2=12$ ) 作成した。

$$2 \text{ 偏波演算画像} = \frac{(A - B)}{(A + B)} \quad (5.1)$$

ここで、A, B とは 4 種類ある偏波 (HH, HV, VH, VV) のうちいずれかの後方散乱係数である。

図-5.1 に 12 通りの 2 偏波演算画像の例を示す。

12 通りの 2 偏波演算画像を比較した結果、HH 偏波と VV 偏波を組み合わせた画像 (図-5.1(c),(j)) や HV 偏波と VH 偏波を組み合わせた画像 (図-5.1(e),(h)) は画像全体がほとんど同じ色 (ピクセル値) となってしまう、目視による土砂移動箇所の検出が困難であることがわかった。一方、VH 偏波と HH 偏波を組み合わせた画像 (図-5.1(g)) は 12 通りの画像の中で最も土砂災害の発生域とその他の領域のコントラスト差があり、目視による判別が用意であることがわかった。以上の結果より、本章では、VH 偏波と HH 偏波を組み合わせた画像 (A: VH, B: HH) を 2 偏波演算画像として用いることとした。

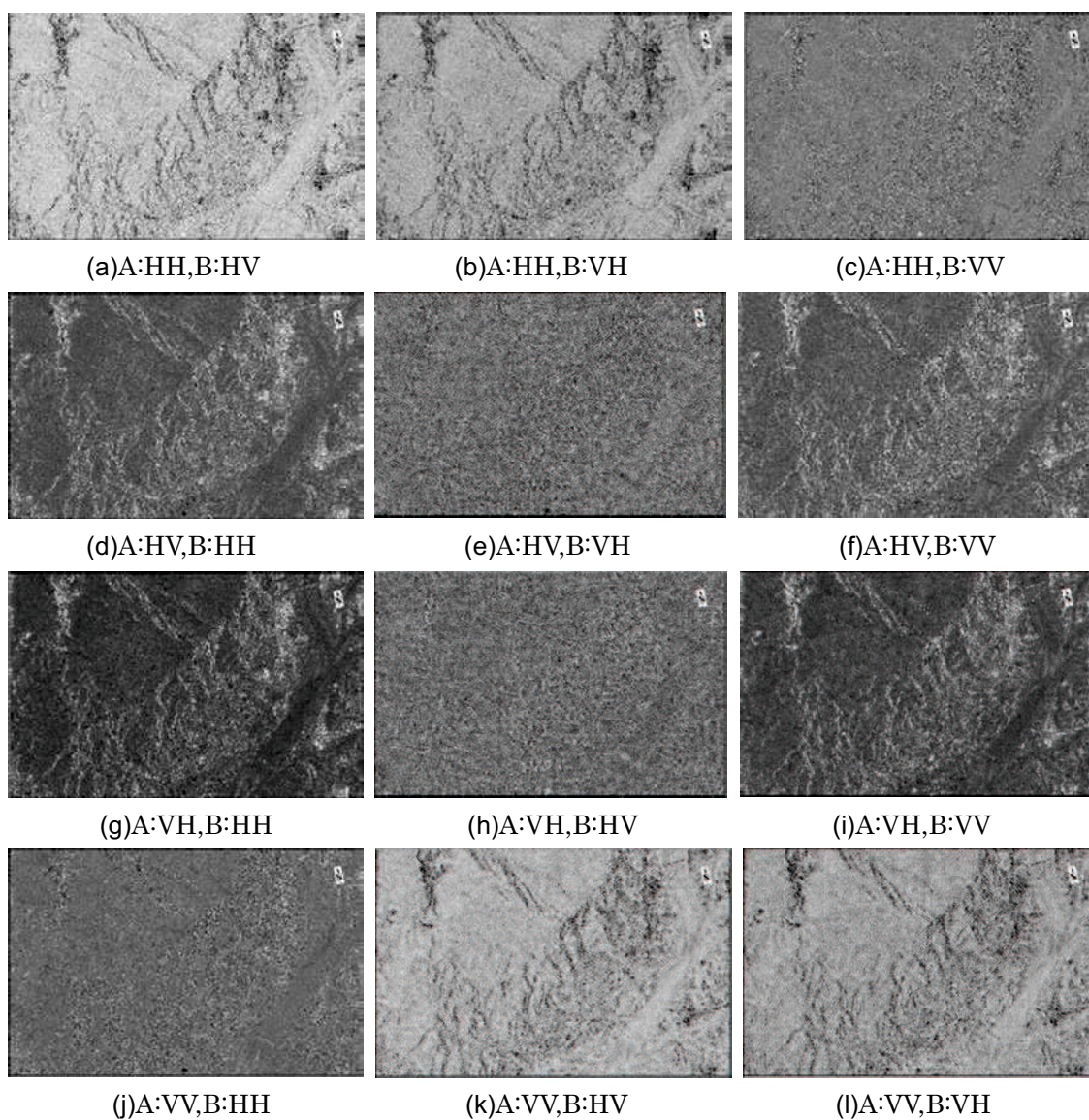


図-5.1 2 偏波演算画像の例

### 5.3.2 4偏波演算画像の検討

筆者は先行研究において、単偏波画像と 2 偏波演算画像を用いた検出を試みており、その結果、使用する偏波が多い 2 偏波演算画像の方が精度良く土砂災害の発生域を検出できることがわかった<sup>12,13</sup>。また、水野らの既往研究において、HH 偏波と VV 偏波（ライク偏波）、HV 偏波と VH 偏波（クロス偏波）はそれぞれ散乱の特性が類似することが報告されている<sup>14</sup>。以上のことより、ここでは 4 種類の偏波データを散乱特性が類似するもの同士、すなわち、ライク偏波、クロス偏波同士で足し合わせることで土砂移動域・植生域・水域が示す値が異なるようにした。また、先行研究の結果から、ライク偏波画像における土砂移動域・植生域・水域が示すピクセル値はクロス偏波画像と比べて大きい値を示すことがわかっている<sup>12,13</sup>。そこでここでは、クロス偏波からライク偏波の値を引くことで、各領域が示す

値がより異なるようにした。以上の結果、ここでは、式(5.1)において  $A:HV+VH$ 、 $B:HH+VV$  とした画像を4偏波演算画像として用いることとした。

#### 5.4 解析手順

図-5.2 に災害発生後の2偏波演算画像および4偏波演算画像を用いた土砂移動箇所の検出と結果の評価までの流れを示す。この流れは、図-4.6 に示した流れの中で単偏波画像を2偏波演算画像および4偏波演算画像に置き換えただけで、あとは全く同じである。

したがって、手順は、2偏波演算画像および4偏波演算画像に関する式(5.2)と式(5.3)、閾値の決定方法のところだけが異なり、あとは4.4で説明した解析手順と同様である。

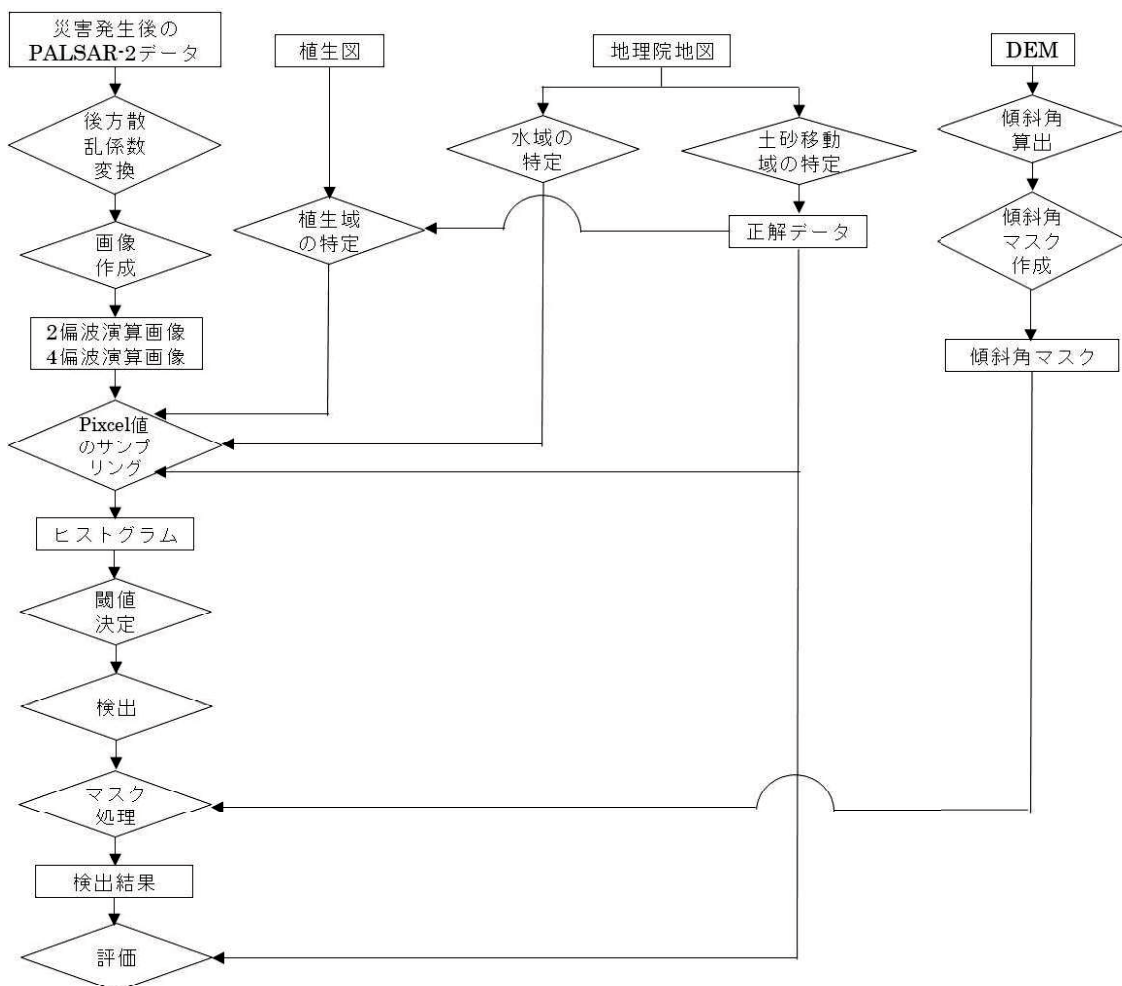


図-5.2 2偏波演算画像および4偏波演算画像を用いた土砂移動箇所の検出と検出結果の評価までの流れ

式(5.2)と式(5.3)を用いて 2 偏波演算画像および 4 偏波演算画像を作成する。

$$2 \text{ 偏波演算画像} = \frac{VH - HH}{VH + HH} \quad (5.2)$$

$$4 \text{ 偏波演算画像} = \frac{\{(HV + VH) - (HH + VV)\}}{\{(HV + VH) + (HH + VV)\}} \quad (5.3)$$

ここで、 $HH$ ,  $HV$ ,  $VH$ ,  $VV$ とは各偏波の後方散乱係数である。

次に、各領域のヒストグラムを基に土砂移動箇所を検出するための閾値を求める。図-5.3に2偏波演算画像における各領域のヒストグラムの例を示す。図からわかるように、2偏波演算画像( $VH$ ,  $HH$ )のヒストグラムは単偏波画像とは大きく異なり、各領域のヒストグラムのピーク値は異なるがヒストグラムの重なりが大きく、土砂移動域のヒストグラムの内側に植生域や水域のヒストグラムがある。そのため、ここでは、土砂移動域が示す値の内、植生域と水域が示す値を除外した範囲の値を土砂移動箇所として検出することとした<sup>15)</sup>。なお、4偏波演算画像についても同様の閾値決定方法とした。

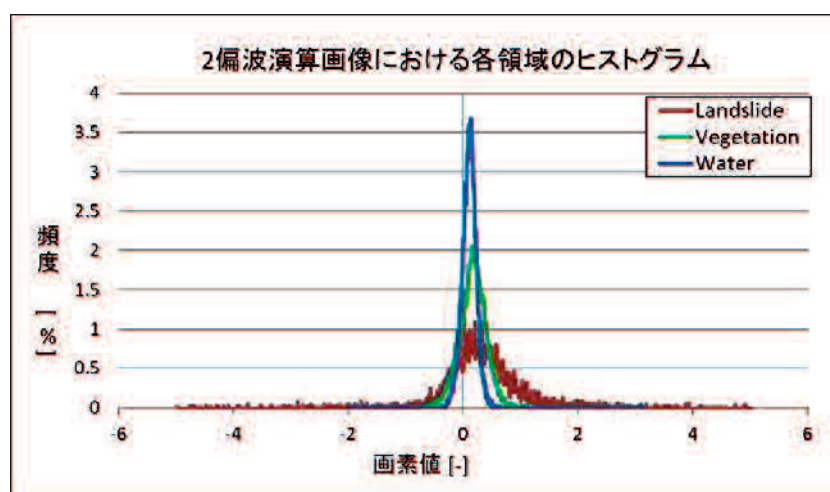


図-5.3 2偏波演算画像( $VH$ ,  $HH$ )における各領域のヒストグラム

## 5.5 検出結果と考察

本章では、平成26年8月豪雨において特に被害が大きかった安佐南区の八木・緑井地区と安佐北区の可部東地区の2地区を解析対象地区として、八木・緑井地区では19箇所の土砂移動箇所を、可部東地区では12箇所の土砂移動箇所を対象に検出を行う。図-5.4に本章で対象とする解析対象地区の位置と範囲を示す。なお、ここでは正解データの都合上、八木・緑井地区と可部東地区のみを対象に検出を行う。





図-5.4 平成 26 年 8 月豪雨における解析対象地区の位置と範囲

### 5.5.1 八木・緑井地区を対象とした場合の検出結果と考察

はじめに、八木・緑井地区を対象とした土砂移動箇所の検出結果について説明する。

2 偏波演算画像と 4 偏波演算画像における各領域のヒストグラムより求めた閾値を表-5.3 にまとめて示す。各領域のヒストグラムより、2 偏波演算画像では、土砂移動域は $-20.70 \sim 9.71$ 、植生域と水域は $-2.20 \sim 0.96$  の値を示すことがわかった。そのため、 $-20.70 \sim -2.20$  と  $0.96 \sim 9.71$  の範囲の値を土砂移動箇所として検出することとした。一方、4 偏波演算画像では、土砂移動域は $-37.30 \sim 16.09$ 、植生域と水域は $-0.64 \sim 0.98$  の値を示すことがわかった。そのため、 $-37.30 \sim -0.64$  と  $0.98 \sim 16.09$  の値を土砂移動箇所として検出することとした。

次に、表-5.3 の閾値を用いた検出結果を図-5.5 と図-5.6 にそれぞれ示す。図の黄色と青色の線分は正解とする実際の土砂移動箇所、赤色で表示した領域は土砂移動箇所として検出した結果を示す。なお、画像は Descending 右向き観測の画像であるため、黄色の線分は衛星から観て手前側、青色の線分は奥側の斜面にある土砂移動箇所を示したものである。また、検出結果は傾斜角が 10 度未満の領域をマスク処理することで平地の誤検出を除去したものである。

また、表-5.4 にそれぞれの画像における検出結果と各土砂移動箇所の詳細をまとめて示す。表の斜面の向きとは、衛星の観測方向を 0 度として時計回りを正、反時計回りを負の数値で表した各土砂移動箇所の平均的な斜面の向きである。また、表の○は検出成功、△は部



表-5.3 八木・緑井地区の2偏波演算画像と4偏波演算画像における閾値

偏波	2偏波演算画像	4偏波演算画像
閾値	-20.70~-2.20, 0.96~9.71	-37.30~-0.64, 0.98~16.09

分検出成功、×は検出失敗を意味する。

2偏波演算画像を用いた検出では、林らの既往研究で報告されている、衛星からの傾斜方向が遠ざかるにつれて検出精度が低下する傾向<sup>12)</sup>が、単偏波画像を用いた場合と比べて顕著に現れており、手前側の斜面と奥側の斜面で土砂移動箇所の検出結果に違いが見られた。具体的には、手前側の土砂移動箇所(図-5.5の1~11)は11箇所中11箇所見落としなく検出することができたが、奥側の土砂移動箇所(図-5.5の12~19)は13の土砂移動箇所の一部しか検出することができず8箇所中1箇所しか検出することができなかった。ここで、検出結果と斜面の向きについて調べた結果、表-5.4より、単偏波画像を用いた検出と同様に、検出精度に違いがみられるのは衛星から観て斜面の方向が±90度以上の場合であり、斜面の向きが検出精度と関係していることがわかった。しかし、土砂移動箇所の面積と検出精度の関係性については、単偏波画像を用いた場合と同様に確認することができなかった。

また、2偏波演算画像を用いた場合の検出結果は、単偏波画像を用いた場合の結果と比べて誤検出が少ないことがわかった。これは、2偏波演算画像では土砂移動域が示す値から植生域と水域が示す値を除去したことで、異なる領域にもかかわらず同じ値を示すピクセルが大幅に減り、植生域における誤検出が低減できたためである。

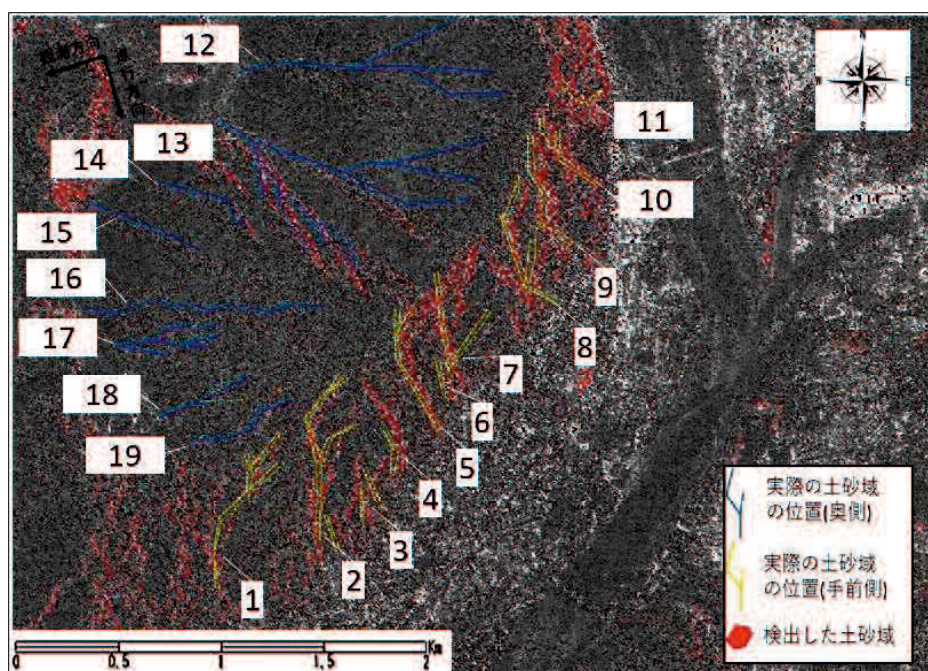


図-5.5 八木・緑井地区の2偏波演算画像を用いた検出結果

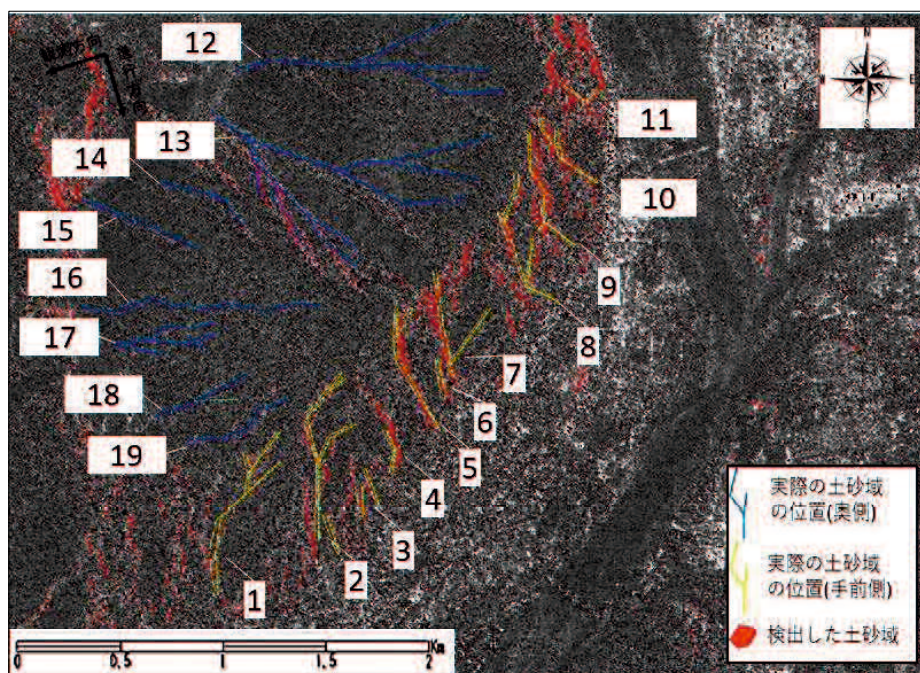


図-5.6 八木・緑井地区の4偏波演算画像を用いた検出結果

表-5.4 八木・緑井地区における2偏波演算画像および4偏波演算画像の検出結果

番号	面積[m <sup>2</sup> ]	斜面の向き[度]	2偏波演算画像	4偏波演算画像
1	22,104	64.6	○	×
2	27,288	85.6	○	○
3	17,721	51.6	○	○
4	7,261	33.6	○	○
5	25,218	42.6	○	○
6	3,141	33.6	○	○
7	30,942	52.6	△	△
8	27,486	41.6	△	△
9	15,966	22.6	○	○
10	15,705	12.6	○	○
11	13,689	2.6	○	○
12	34,587	-171.4	×	×
13	90,009	136.6	×	×
14	4,401	-164.4	△	△
15	5,922	167.6	×	×
16	16,821	171.6	×	×
17	15,066	-176.4	×	×
18	5,076	-179.4	×	×
19	7,821	167.6	×	×



一方、4 偏波演算画像を用いた検出では、2 偏波演算画像を用いた場合と概ね同じ結果となり、手前側の土砂移動箇所は概ね検出することができたが、奥側の土砂移動箇所はほとんど検出することができなかった。また、単偏波画像を用いた場合と比べて誤検出が少ない検出結果であった。

ここで、山の手前側と奥側で検出結果に大きな差が表れた原因を調べるため、手前側と奥側の両側の斜面における各領域のピクセル値の比較を行った。図-5.7 に八木・緑井地区における手前側と奥側の各領域のヒストグラムを示す。(a)は手前側の土砂移動域、(b)は手前側の土砂移動域、(c)は奥側の植生域、(d)は奥側の植生域のヒストグラムを示す。なお、水域については同じ平地の河川よりサンプリングを行っており、手前側と奥側の区別がないため、ここでの比較検証を省略する。

各ヒストグラムを比較した結果、手前側では土砂移動域が示す値の範囲が $-37.30 \sim 16.09$ と比較的広く、かつ、ピーク値が植生域と異なるのに対して、奥側では値の範囲が $-0.82 \sim 0.98$ と狭く、かつ、ピーク値が土砂移動域と植生域でほぼ同じであることがわかった。すなわち、手前側においてはピクセル値によって土砂移動域と植生域を区別することができるが、奥側においてはそれが困難だということがわかった。そのため、奥側の斜面の土砂移動箇所については、逆の方向から観測したデータ（例えば、Ascending 右向き観測）を用いて検出を行う必要がある。

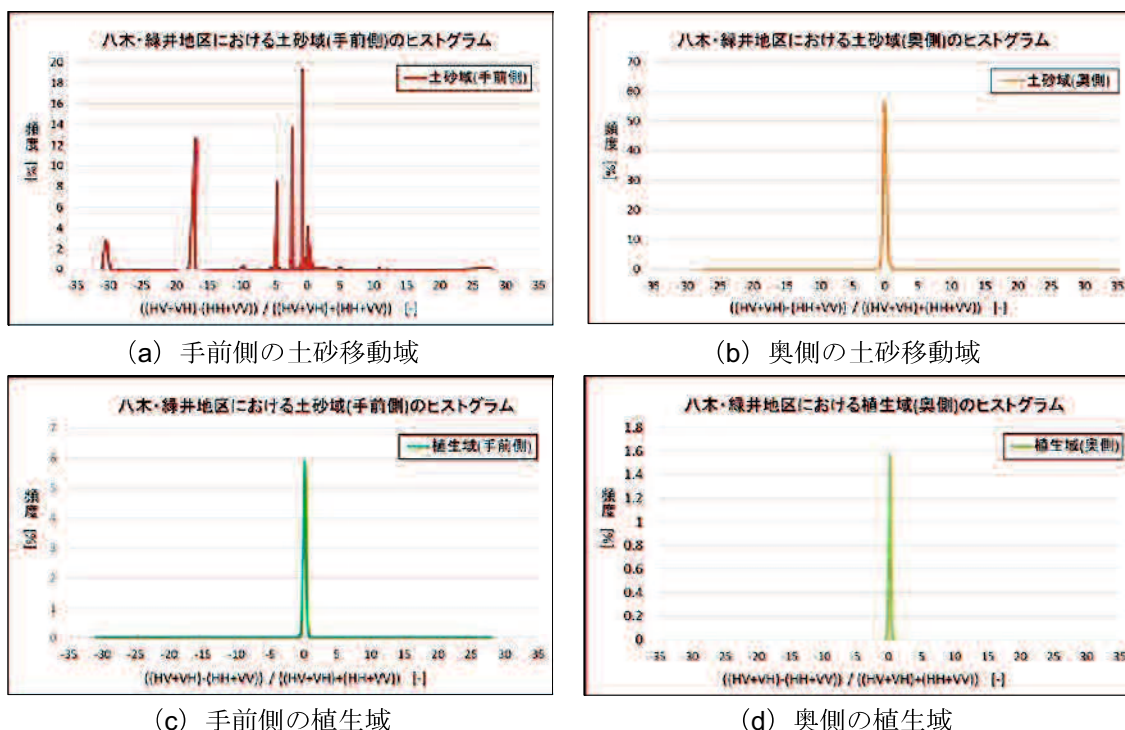


図-5.7 八木・緑井地区の手前側と奥側の斜面における各領域のヒストグラム

### 5.5.2 可部東地区を対象とした場合の検出結果と考察

次に、可部東地区を対象とした場合の検出結果について説明する。

ここで、光学センサ画像を用いた場合の結果ではあるが、1枚の画像中の土砂移動箇所は地区が異なる場合でも同じ閾値で検出できることが先行研究の結果より得られている<sup>16)</sup>。そこで、ここでは、八木・緑井地区で求めた表-5.3の閾値を用いて可部東地区における土砂移動箇所の検出を試みる。

可部東地区における2偏波演算画像と4偏波演算画像の検出結果を図-5.8と図-5.9に示す。また、表-5.5にそれぞれの画像における検出結果と各土砂移動箇所の詳細をまとめて示す。

可部東地区では、八木・緑井地区における検出結果と同様に、2偏波演算画像用いた場合と4偏波演算画像を用いた場合の検出結果には大きな違いは見られず、両画像において12箇所中6箇所の土砂移動箇所を検出できた。すなわち、1枚の画像中であれば地区が異なる場合でも同じ閾値で土砂移動箇所を検出できることが確認できた。

しかし、単偏波画像を用いた検出結果と同様に、2偏波演算画像を用いた場合と4偏波演算画像を用いた場合の両方で、±90度を境とした斜面の向きの違いによる検出精度の違いは見られなかった。例えば、2偏波演算画像と4偏波演算画像の両方において、2の土砂移動箇所は斜面の向きが90度未満（手前側）の斜面に位置しているが検出できなかった。また、5と6の土砂移動箇所は斜面の向きが90度以上（奥側）の斜面に位置しているが検出できた。

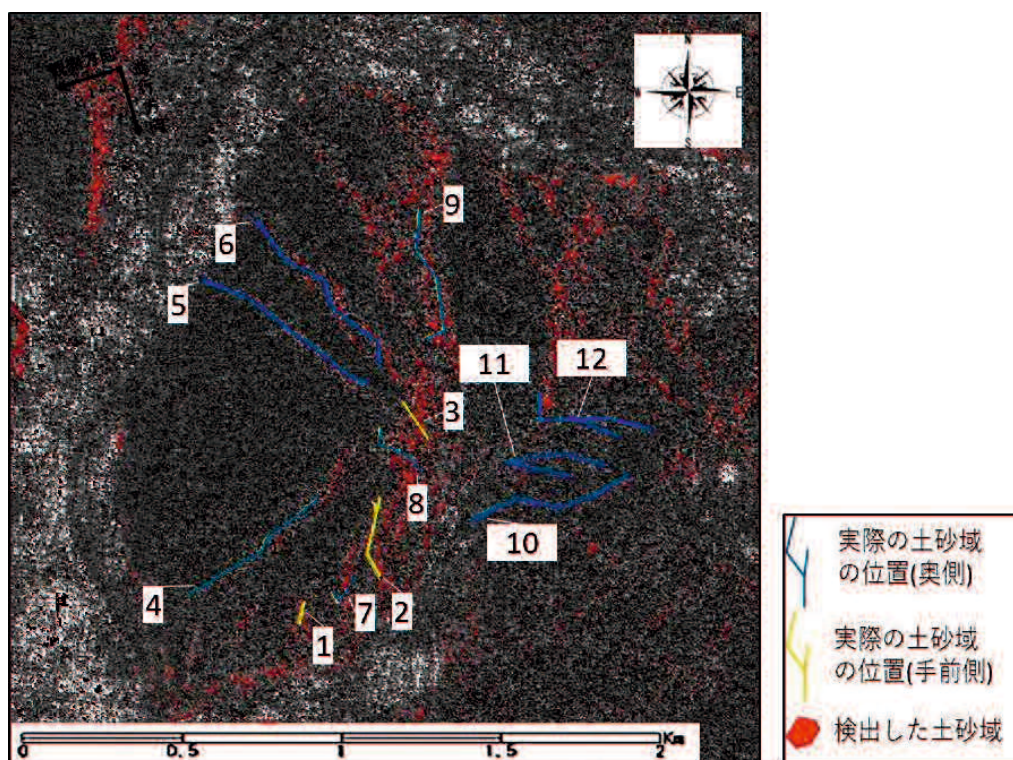


図-5.8 可部東地区の2偏波演算画像を用いた検出結果

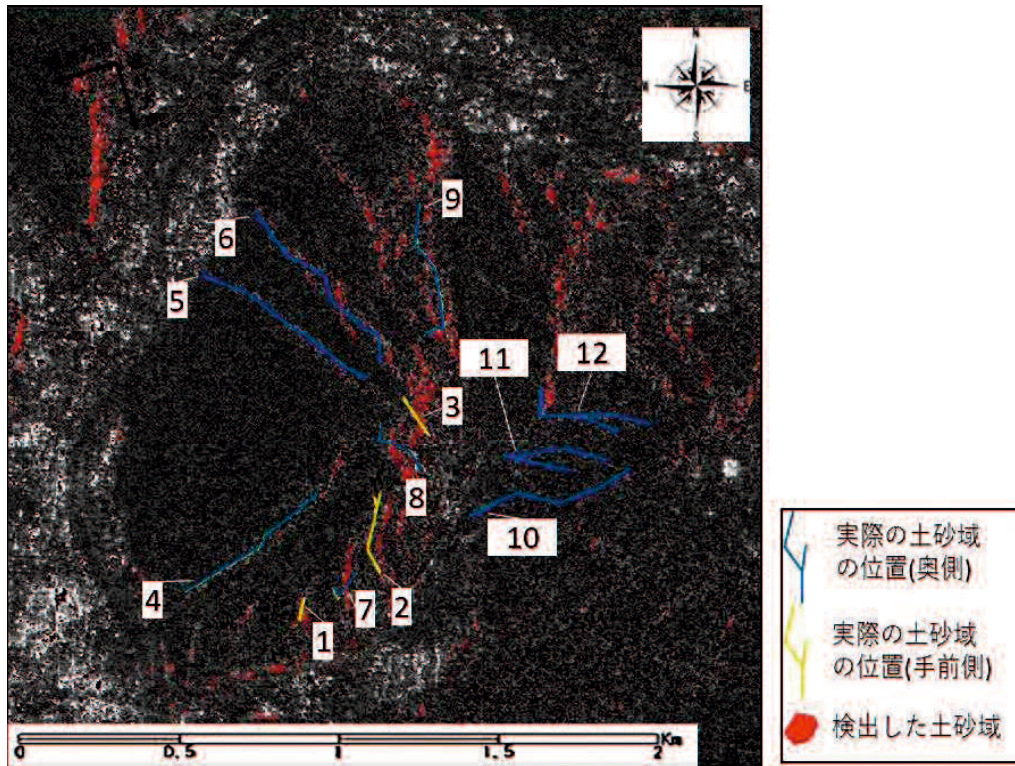


図-5.9 可部東地区の4偏波演算画像を用いた検出結果

表-5.5 可部東地区における2偏波演算画像および4偏波演算画像の検出結果

番号	面積[m <sup>2</sup> ]	斜面の向き[度]	2偏波演算画像	4偏波演算画像
1	1,917	84.6	○	○
2	29,961	32.6	×	×
3	8,856	39.6	○	○
4	13,545	151.6	×	×
5	14,463	139.6	○	○
6	24,030	100.6	○	○
7	35,55	98.6	×	×
8	11,268	125.6	△	×
9	7,261	104.6	△	△
10	8,775	171.6	×	×
11	25,677	143.6	×	×
12	12,006	149.6	×	×



## 5.6 結語

本章では、4種類ある偏波（HH, HV, VH, VV）を組み合わせた新しい指標として、2偏波演算画像と4偏波演算画像を考案し、平成26年8月豪雨を対象として2偏波演算画像と4偏波演算画像を用いた土砂移動箇所の検出手法について検討を行った。

その結果、以下に示す知見を得ることができた。

①八木・緑井地区を対象とした場合の結果から、2偏波演算画像では $-20.70 \sim -2.20$ と $0.96 \sim 9.71$ の範囲の値を、4偏波演算画像では $-37.30 \sim -0.64$ と $0.98 \sim 16.09$ の値を土砂移動箇所として検出することで、衛星から観て山の手前側に位置する土砂移動箇所を11箇所中11箇所全て検出できた。しかし、斜面の向きが $\pm 90$ 度を境として、奥側の土砂移動箇所は8箇所中1箇所しか検出することができなかった。手前側と奥側における土砂移動箇所と植生域のピクセル値を調べた結果、手前側においては土砂移動域が示すピクセル値の範囲が広く植生域とピーク値が異なるため、ピクセル値によって土砂域と植生域を区別することができるが、奥側においてはそれが困難であることがわかった。そのため、奥側の土砂移動箇所については、逆の方向から観測したデータ（例えば、Ascending右向き観測）を用いて検出を行う必要がある。

②可部東地区を対象とした場合の検出結果から、2偏波演算画像を用いた場合と4偏波演算画像を用いた場合の両方において、八木・緑井地区で求めた閾値と同じ値で12箇所中6箇所の土砂移動箇所を検出できた。すなわち、SAR画像を用いた場合でも光学センサ画像を用いた場合と同様に、1枚の画像中であれば地区が異なる場合でも同じ閾値で土砂移動箇所を検出できることが確認できた。しかし、八木・緑井地区の結果とは異なり、検出精度と斜面の向きとの関係性は見られなかった。これは、八木・緑井地区では手前側や奥側では斜面の向きが概ね一定であるのに対して、可部東地区では斜面の向きが一定ではなく様々な向きを向いており複雑な地形であるためだと考えられ、この点については単偏波画像を用いた場合と同様である。

③八木・緑井地区と可部東地区を対象とした結果から、2偏波演算画像を用いた場合と4偏波演算画像を用いた場合の検出結果に大きな違いは見られないことがわかった。また、2偏波演算画像および4偏波演算画像を用いた検出では、単偏波画像を用いた検出と比べて、土砂移動箇所の見落としがあるが誤検出が少ない検出結果が得られることがわかった。

## 参考文献

- 1) 公益社団法人土木学会：平成 26 年 8 月広島豪雨災害調査報告書, 2015.
- 2) 宇宙航空研究開発機構第一宇宙技術部門地球観測研究センター：ALOS プロジェクト, ALOS-2 の概要, <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/about/joverview.htm>.
- 3) 環境省自然環境局：1/2.5 万現存植生図, <http://www.vegetation.biodic.go.jp/>.
- 4) 国土交通省国土地理院：地理院地図, [https://maps.gsi.go.jp/#12/32.783522/131.139679/&ls=\\_ort&disp=1&lcd=\\_ort&vs=c1j0h0k0l0u0t0z0r0s0f1&d=vl](https://maps.gsi.go.jp/#12/32.783522/131.139679/&ls=_ort&disp=1&lcd=_ort&vs=c1j0h0k0l0u0t0z0r0s0f1&d=vl).
- 5) 国土交通省国土地理院：地理院地図, 写真判読図 (8/28・30・31 垂直写真), [http://maps.gsi.go.jp/?ll=34.515044,132.497005&z=13&base=std&ls=hisai1408oame\\_hiroshima3&cd=f2%2Ff2\\_2%2Ff2\\_2\\_0&vs=c1j0l0u0&d=l#13/34.515044/132.497005/&base=std&ls=std%7Chisai1408oame\\_hiroshima3&disp=11&vs=c1j0h0k0l0u0t0z0r0s0f1&d=l](http://maps.gsi.go.jp/?ll=34.515044,132.497005&z=13&base=std&ls=hisai1408oame_hiroshima3&cd=f2%2Ff2_2%2Ff2_2_0&vs=c1j0l0u0&d=l#13/34.515044/132.497005/&base=std&ls=std%7Chisai1408oame_hiroshima3&disp=11&vs=c1j0h0k0l0u0t0z0r0s0f1&d=l).
- 6) 国土交通省国土地理院：地理院地図で得られる値等について, <https://maps.gsi.go.jp/help/how-touse.html>.
- 7) 水野正樹, 江川真史, 神山嬢子, 佐藤匠, 蒲原潤一：衛星多偏波 SAR 画像による大規模崩壊の緊急判読調査手法, 土木技術資料, 第 55 巻, 第 11 号, pp.35-38, 2013.
- 8) 渡邊学, 米澤千夏, 園田潤, 島田政信：L-band SAR (PALSAR-2) を用いた, “広域データ”からの土砂災害域検出, 日本リモートセンシング学会誌, 第 37 巻, 第 1 号, pp.21-26, 2017.
- 9) CAO Yun-ganga, YAN Li-juanb, ZHENG Zezhonga :EXTRACTION OF INFORMATION ON GEOLOGY HAZARD FROM MULTIPOLARIZATION SAR IMAGES, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXVII. Part B4p, pp.1529-1532, 2008.
- 10) 林真一郎, 水野正樹, 小山内信智, 西真佐人, 清水孝一, 中川和男, 松本定一：ALOS (だいち)合成開口レーダを用いた崩壊地抽出手法と適用性, 砂防学会誌, 第 65 巻, 第 4 号, pp.3-14, 2012.
- 11) 鴻野智崇, 井上雄太, 伊藤哲司, 桑原祐史：SAR と光学センサ利用によるネパール国北部山岳地帯を対象とした斜面災害域抽出効果, 環境情報科学論文集, 第 31 巻, pp.241-246, 2017.
- 12) 江口毅, 三浦房紀：ALOS-2/PALSAR-2 を用いた平成 26 年 8 月広島豪雨における斜面崩壊の検出の試み, 第 35 回日本自然災害学会学術講演会, III-4-5, 2016.
- 13) 江口毅, 塩屋篤, 日高真吾, 三浦房紀：災害発生後のみの PALSAR-2 画像を用いた斜面崩壊発生域抽出の試み, 土木学会中国支部平成 28 年度研究発表会, IV-18, 2016.
- 14) 水野正樹, 神山嬢子, 江川真史, 佐藤匠, 蒲原潤一：2 偏波 SAR 画像による大規模崩壊及び河道閉塞箇所 の 範 読 調 査 手 法 ( 案 ), 国 土 技 術 政 策 総 合 研 究 所 資 料, 第 791 号, 2014.
- 15) 江口毅, 三浦房紀：災害発生後のみの ALOS-2/PALSAR-2 画像による斜面崩壊域の早期発見手法, 土木学会論文集 F6 (安全問題), 第 74 巻, 第 1 号, pp.1-10, 2018.
- 16) 江口毅, 三浦房紀：衛星リモートセンシングを用いた地震および豪雨による斜面崩壊発生箇所の早期発見手法, 土木学会論文集 F6 (安全問題), 第 72 巻, 第 1 号, pp.11-20, 2016.



## 6 結論

### 6.1 本研究のまとめ

本研究では、災害発生前のアーカイブ画像が入手できない場合やデータセット毎の補正処理を必要としない解析手法の開発を目的とし、災害発生後のみの衛星画像（光学センサおよび SAR）から災害発生域、ここでは土砂災害発生域を検出する手法の開発を行った。また、本研究で開発した 5 種類の検出手法における、検出精度、災害への適用度、データの入手についての特徴を整理し、各検出手法の有効性について検証した。

以下に、各章の要旨と得られた結論を示す。

#### 6.1.1 各章のまとめ

##### 第 1 章「序論」

第 1 章では、日本の災害背景と災害発生時における災害対応の現状と課題についてまとめることで本研究の背景について説明した。また、光学センサ画像および SAR 画像を用いた土砂災害の検出に関する既往研究の概要と課題について整理することで本研究の目的について説明した。

##### 第 2 章「災害発生後の NDVI 画像を用いた土砂災害検出手法」

第 2 章では、災害発生後の光学センサ画像から土砂移動箇所を検出する手法として、2008 年岩手・宮城内陸地震と 2009 年中国・九州北部豪雨において発生した土砂災害を対象として、災害発生後に観測された ALOS/AVNIR-2 データの NDVI 画像を用いた検出手法について検討を行った。また、検出手法の汎用性について検討するため、2016 年熊本地震を対象として WorldView-2 データを用いた検出も試みた。

その結果、以下に示す知見を得ることができた。

2008 年岩手・宮城内陸地震および 2009 年中国・九州北部豪雨における各地区を対象とした検出結果から、災害発生後の NDVI 画像における土砂移動域・植生域・水域のヒストグラムの交点を閾値とすることで、各地区の土砂移動箇所を精度良く検出できることを示すことができた。すなわち、災害発生後のみの NDVI 画像からでも土砂移動箇所を検出でき、その結果に道路や家屋などの GIS データを併用することで土砂災害の発生箇所を特定できることを示すことができた。また、各地区の閾値は地区が異なる場合でも概ね同じであることがわかった。

広域を対象とした検出結果から、2008 年岩手・宮城内陸地震では閾値を 0.15～0.62、2009 年中国・九州北部豪雨では閾値を 0.15～0.50 とすることで、災害発生後の NDVI 画像から同

じ閾値で広域の各土砂移動箇所を検出できることを示すことができた。また、500m<sup>2</sup>以上の規模の土砂域を対象とした場合、2008年岩手・宮城内陸地震では土砂移動箇所を検出率99%正答率29%、2009年中国・九州北部豪雨では検出率93%正答率4%の検出精度で検出でき、誤検出は多いものが見落としが少なく検出できることを示すことができた。しかし、傾斜角マスクで除去できなかった傾斜角が10度以上の領域にある道路や畑、また雲や雲の影といった場所において誤検出が多い。

2016年熊本地震を対象とした検出結果から、WorldView-2データを用いた場合でも、500m<sup>2</sup>以上の規模の土砂移動箇所を対象とした場合、検出率91%正答率18%の検出精度で土砂移動箇所を検出できることを示すことができた。しかし、WorldView-2など高分解能衛星画像を使用した場合、樹木の密度が低く地表面の土壌が上空から確認できる場所などを誤検出してしまう場合があり、このことについて留意する必要があることがわかった。

### 第3章「災害発生後のNBR画像を用いた土砂災害検出手法」

第3章では、土砂移動域・植生域・水域がそれぞれ異なる値を示す新たな指標として、NIR, Blue, Redの3Bandを組み合わせたNBRを考案し、2008年岩手・宮城内陸地震と2009年中国・九州北部豪雨において発生した土砂災害を対象として、NBR画像を用いた検出を試みた。また、検出手法の汎用性について検討を行うため、2016年熊本地震を対象としてWorldView-2データを用いた検出も試みた。

その結果、以下に示す知見を得ることができた。

2008年岩手・宮城内陸地震および2009年中国・九州北部豪雨における各地区を対象とした検出結果から、災害発生後のNBR画像における土砂移動域・植生域・水域のヒストグラムの交点を閾値とすることで、災害発生後のみのNBR画像からでも土砂移動箇所を検出でき、その結果に道路や家屋などのGISデータを併用することで土砂災害の発生箇所を特定できることを示すことができた。また、各地区の閾値は地区が異なる場合でも概ね同じであることがわかった。

広域を対象とした検出結果から、2008年岩手・宮城内陸地震では閾値を $-0.23 \sim 0.13$ 、2009年中国・九州北部豪雨では閾値を $-0.21 \sim 0.02$ とすることで、災害発生後のNBR画像から同じ閾値で広域の各土砂移動箇所を検出できることを示すことができた。また、500m<sup>2</sup>以上の規模の土砂移動箇所を対象とした場合、2008年岩手・宮城内陸地震では土砂移動箇所を検出率80%正答率52%、2009年中国・九州北部豪雨では検出率73%正答率3%の検出精度で検出でき、NDVI画像を用いた場合と比べて土砂移動箇所を誤検出が少なく検出できることを示すことができた。しかし、NDVI画像を用いた場合と同様に、道路や畑、また雲や雲の影といった場所を誤検出してしまう。

また、NDVI画像、NBR画像を用いた場合の検出精度の比較から、それぞれの検出手法には特徴があり、NDVI画像を用いた検出手法は土砂移動箇所の見落としが少ない情報を得ることができ、NBR画像を用いた検出手法は誤検出が少ない情報を得ることができ



わかった。すなわち、NDVI画像を用いた場合の検出結果は、航空機やヘリコプターなどの飛行計画を立てる際に有効な情報となり、NBR画像を用いた場合の検出結果は、自衛隊や救援隊の派遣先を決める際に有効な情報になると考えられる。

2016年熊本地震を対象とした検出結果から、WorldView-2データを用いた場合でも、500m<sup>2</sup>以上の規模の土砂移動箇所を対象とした場合、検出率91%正答率21%の検出精度で土砂移動箇所を検出できることを示すことができた。しかし、WorldView-2など高分解能衛星画像を使用した場合、NBR画像を用いた場合でも樹木の密度が低く地表面の土壌が上空から確認できる場所などを誤検出してしまう場合があり、このことについて留意する必要があることがわかった。

#### 第4章「災害発生後の単偏波画像を用いた土砂災害検出手法」

第4章では、条件の良い災害発生前画像が得られない場合を想定して、平成26年8月豪雨を対象に災害発生後のPALSAR-2単偏波(HH, HV, VH, VV)画像を用いて土砂移動箇所の検出を試みた。

その結果、以下に示す知見を得ることができた。

各偏波画像における土砂移動域・植生域・水域のヒストグラムは、光学センサ画像の場合と比べて各領域のヒストグラム同士の重なりが大きく、異なる領域にもかかわらず同じ値を示すピクセルが多く存在することがわかった。また、全ての偏波画像において、各領域は土砂移動域、植生域、水域の順で大きい値を示し、各偏波画像の違いはそれぞれの領域が示す値の違いだけであることがわかった。

八木・緑井地区を対象とした場合の結果から、八木・緑井地区では土砂移動箇所の検出結果は衛星から観て手前側の斜面と奥側の斜面で異なり、手前側の土砂移動箇所は概ね検出できたが奥側の土砂移動箇所はあまり検出することができず、その境は±90度であることがわかった。また、八木・緑井地区ではHH偏波画像を用いた場合が最も土砂移動箇所を検出することができ、閾値を-6.2~13.4と設定することで19箇所中18箇所の土砂移動箇所を検出することができた。

可部東地区を対象とした場合の結果から、可部東地区では斜面の向きに関係なく各偏波において土砂移動箇所を検出することができた。また、偏波による検出結果の違いは見られなかった。この原因としては可部東地区における複雑な地形が考えられ、今後の研究において検討を行う必要がある。

また、可部東地区を対象とした場合の結果から、光学センサの場合と同様に、SAR画像を用いた場合でも1枚の画像中であれば同じ閾値を用いて異なる地区の土砂移動箇所を検出することがわかった。ただし、ここでの閾値は平成26年8月豪雨を対象とした場合に得られたものであり、閾値については今後の研究において更なる検討を行う必要がある。

## 第5章「災害発生後の複数偏波画像を用いた土砂災害検出手法」

第5章では、4種類ある偏波（HH, HV, VH, VV）を組み合わせた新しい指標として、2偏波演算画像と4偏波演算画像を考案し、平成26年8月豪雨を対象として2偏波演算画像と4偏波演算画像を用いた土砂移動箇所を検出手法について検討を行った。

その結果、以下に示す知見を得ることができた。

八木・緑井地区を対象とした場合の結果から、2偏波演算画像では $-20.70 \sim -2.20$ と $0.96 \sim 9.71$ の範囲の値を、4偏波演算画像では $-37.30 \sim -0.64$ と $0.98 \sim 16.09$ の値を土砂移動箇所として検出することで、衛星から観て山の手前側に位置する土砂移動箇所を11箇所中11箇所全て検出できた。しかし、斜面の向きが $\pm 90$ 度を境として、奥側の土砂移動箇所は8箇所中1箇所しか検出することができなかつた。手前側と奥側における土砂移動箇所と植生域のピクセル値を調べた結果、手前側においては土砂移動域が示すピクセル値の範囲が広く植生域とピーク値が異なるため、ピクセル値によって土砂域と植生域を区別することができるが、奥側においてはそれが困難であることがわかった。そのため、奥側の土砂移動箇所については、逆の方向から観測したデータ（例えば、Ascending右向き観測）を用いて検出を行う必要がある。

可部東地区を対象とした場合の検出結果から、2偏波演算画像を用いた場合と4偏波演算画像を用いた場合の両方において、八木・緑井地区で求めた閾値と同じ値で12箇所中6箇所の土砂移動箇所を検出できた。すなわち、SAR画像を用いた場合でも光学センサ画像を用いた場合と同様に、1枚の画像中であれば地区が異なる場合でも同じ閾値で土砂移動箇所を検出できることが確認できた。しかし、八木・緑井地区の結果とは異なり、検出精度と斜面の向きの関係性は見られなかつた。これは、八木・緑井地区では手前側や奥側では斜面の向きが概ね一定であるのに対して、可部東地区では斜面の向きが一定ではなく様々な向きを向いており複雑な地形であるためだと考えられ、この点については単偏波画像を用いた場合と同様である。

八木・緑井地区と可部東地区を対象とした結果から、2偏波演算画像用いた場合と4偏波演算画像を用いた場合の検出結果に大きな違いは見られないことがわかった。また、2偏波演算画像および4偏波演算画像を用いた検出では、単偏波画像を用いた検出と比べて、土砂移動箇所の見落としがあるが誤検出が少ない検出結果が得られることがわかった。

### 6.1.2 各検出手法のまとめ

本研究で開発した NDVI 画像、NBR 画像、単偏波画像、2 偏波演算画像、4 偏波演算画像を用いた 5 種類の検出手法は、それぞれ検出精度、災害への適用度、データの入手について特徴がある。表-6.1 に本研究で開発した手法の特徴をまとめて示す。なお、表中の評価は 5 種類の検出手法に対して相対的に 3 段階で評価したものである。

NDVI 画像を用いた検出手法は、見落としが少ない検出ができる反面、誤検出が多い特徴がある。太陽光を利用した画像であるため、雲の影響が少ない地震災害への適用度は高いが、

被災地域が雲に覆われることの多い豪雨災害への適用度は低い。また、夜間にはデータが入手できないため SAR データと比べて観測頻度が低い特徴がある。そのため、NDVI 画像を用いた検出手法は、ヘリコプターや航空機の飛行計画を立てる際に、土砂災害の見落としが少ない情報を提供することに有効である。

NBR 画像を用いた検出手法は、NDVI 画像を用いた手法と比べて見落としがある反面、誤検出が少ない特徴がある。災害への適用度とデータの入手については、NDVI 画像を用いた検出手法と同様である。そのため、NBR 画像を用いた検出手法は、自衛隊や消防隊らの派遣先を決める際に、誤検出が少ない土砂災害情報を提供することに有効である。

単偏波画像を用いた検出手法は、見落としが少ない検出ができる反面、誤検出が多い特徴がある。マイクロ波を利用した画像であるため、天候に左右されず被災地域の観測ができる。しかし、斜面の向きによっては検出が困難な場合があるため、地震災害および豪雨災害への適用度は中程度である。また、降雨時だけでなく夜間でもデータを入手できるため、観測頻度が高い特徴がある。そのため、単偏波画像を用いた検出手法は、夜間や被災地域が雲に覆われている場合において土砂災害が集中的に発生しているおそれがある地域を把握する際に有効である。

2 偏波演算画像および 4 偏波演算画像を用いた検出手法は、単偏波画像を用いた手法と比べて見落としがある反面、誤検出が少ない特徴がある。災害への適用度については単偏波画像を用いた手法と同様である。しかし、2 偏波や 4 偏波モードで観測される機会は少ないため、観測頻度は低い特徴がある。そのため、2 偏波演算画像や 4 偏波演算画像を用いた検出手法は、夜間や被災地域が雲に覆われている場合において土砂災害の発生が懸念される箇所を把握する際に有効である。

なお、本研究では各検出手法の特徴について検討するため、それぞれの検出手法単体での検出結果について整理した。しかし、複数の検出手法を組み合わせることで、より高い検出精度や災害への適用度を実現することができると考えられる。例えば、NDVI 画像を用いた検出結果と NBR 画像を用いた検出結果の両方において検出した箇所を土砂移動箇所とすることで、より信頼性のある情報を得ることが可能になる。

表-6.1 本研究で開発した手法の特徴

手法	検出精度		災害への適用度		データの入手
	検出率	正答率	地震	豪雨	観測頻度
NDVI 画像	高	低	高	低	中
NBR 画像	中	高	高	低	中
単偏波画像	高	低	中	中	高
2 偏波演算画像	中	中	中	中	低
4 偏波演算画像	中	中	中	中	低

## 6.2 今後の課題と将来の展望

本研究で開発した手法は全て、画像のピクセル値を基準とした閾値を用いて土砂災害の検出を行うため、道路や畑など異なる領域にもかかわらず土砂移動箇所と同じ値を示すピクセルは区別することができず誤検出してしまふ。また、災害発生前から土壌が露出している裸地についても誤検出してしまふ。そのため、これらの誤検出を低減するためには、例えば、道路や畑などの GIS データや裸地マップなどの活用が有効であり、衛星データ以外のデータを活用した手法については今後の研究で検討を行う予定である。

また、本研究で得られた閾値は、2008 年岩手・宮城内陸地震および 2009 年中国・九州北部豪雨、2016 年熊本地震、平成 26 年 8 月豪雨を対象とした場合に得られたものであるため、閾値については今後の研究において更なる検討を行う予定である。

本研究における成果は、災害発生前のアーカイブ画像が入手できない場合の土砂災害検出に有効であり、今後打ち上げが予定されている ALOS-3 や ALOS-4 が打ち上げられた際に、アーカイブ画像が整備されるまでの間に発生した土砂災害の検出に貢献できると考える。また、データセット毎の前処理が不要であるため、機械学習におけるトレーニングデータを作成することが可能であり、土砂災害の自動検出に貢献できると考える。

最後に、本研究における成果を災害発生時に実践的に活用するためには、災害時の防災関連機関の対応や現段階における課題などについて整理を行い、研究成果とのすりあわせを行う必要がある。開発した研究成果を研究室内に留めておくのではなく、社会に向けて情報や技術を発信することで防災技術の発展に貢献することも、災害分野の研究において重要な課題と言えよう。

## 謝辞

本論文は著者がこれまで取り組んできた研究成果をまとめたものです。本論文をまとめるにあたり、多くの方々に多大なるご指導、ご協力を頂きましたことを深く感謝し、ここに謝意を表します。

山口大学大学院創成科学研究科准教授 長井正彦先生には、本研究を遂行するにあたり終始暖かいご指導とご鞭撻を頂きました。長井先生からは、衛星リモートセンシングをはじめとするデータサイエンス分野における専門知識や技術だけではなく、世界中で活躍できる人材としてのノウハウや考え方など多くのことを教えて頂きました。心から深く感謝の意を表します。

山口大学大学院創成科学研究科教授 三浦房紀先生には、本研究を遂行するにあたり、防災分野における研究の重要性や異なる専門分野にも興味を持ち視野を広げることの必要性、研究者としての心得など研究を遂行する上で基本的かつ最も重要な事を教えて頂きました。心から深く感謝の意を表します。

山口大学大学院創成科学研究科教授 清水則一先生には、本研究を遂行するにあたり、1つひとつの研究成果を1つの目的に沿ってまとめる論理的な考え方や広い視野をもって研究に取り組むための研究者としての姿勢についてなど、数多くの貴重なご教示を頂きました。心から深く感謝の意を表します。

山口大学大学院創成科学研究科教授 鈴木素之先生には、本研究を遂行するにあたり、結果だけでなくそこまでの過程や物事の因果関係などを丁寧に整理して論文を組み立てるといふ研究をまとめる上で基本的かつ重要なことについて、数多くの貴重なご教示を頂きました。心から深く感謝の意を表します。

山口大学大学院創成科学研究科教授 朝位孝二先生には、本研究を遂行するにあたり、実際の災害現場における課題の観点から、研究成果や研究の今後の展開について数多くの貴重なご教示を頂きました。心から深く感謝の意を表します。

山口大学大学院創成科学研究科教授 中村秀明先生には、本研究を遂行するにあたり、研究の今後の展開を考える上で、機械学習やディープラーニングなどデータサイエンス分野の観点から数多くの貴重なご教示を頂きました。心から深く感謝の意を表します。

6名の先生方に研究成果を情報や技術として社会に広めることで社会貢献をすることの義務や重要性を熱心にご指導して頂いたことは、研究者としての今後の規範にもなるかけがえのないものです。また、様々な専門分野のエキスパートとしてのご教示は、著者自身の研究者としての幅を大きく広げるきっかけとなりました。重ねて深く感謝いたします。

本論文をまとめるにあたり、ご多忙の公務中にもかかわらず有益なご教授を頂きました多くの先生方ならびに学部生、大学院生の頃より勉学をともにした同学年の友人や同学科の後輩にお礼申し上げます。特に井関禎之氏、加藤圭太氏、西岡純氏には同学年として大学生活や研究生活を公私ともに支えて頂きました。また、博士前期課程の後輩にあたります新



将道氏、松井映氏には研究を遂行するにあたり、参考となる資料や情報を提示して頂いたほか、研究の補助をして頂きました。ここに感謝を申し上げます。さらに、ここでは書き表せなかった、数多くの関係者の皆様に対しまして改めて心より御礼申し上げます。

最後に、大学入学から学位取得までの12年間、精神的にも経済的にも支え続けてくれた家族に心から感謝の意を表します。