HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	広域土砂災害の被害状況把握手法に関する研究
Author(s)	林, 真一郎
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(農学)
Dissertation Number	乙第7035号
Issue Date	2017-09-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.r7035
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/67689
Type	doctoral thesis
File Information	Shinichiro_Hayashi.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

広域土砂災害の
被害状況把握手法に関する研究

２０１７年

林　真一郎

目次

第 1 章　緒論.....1
1.1　広域土砂災害に対する取組と課題.....1
1.2　最大被害を推定する指標.....4
1.3　広域土砂災害に対する調査技術の活用実態と課題.....7

第 2 章　研究方法.....28

第 3 章　最大被害を推定する指標の作成に関する研究.....30
3.1　はじめに.....30
3.2　指標の作成手法.....33
3.3　結果と考察.....40
3.4　まとめ.....47

第 4 章　人工衛星 SAR を用いた崩壊地抽出に関する研究.....49
4.1　はじめに.....49
4.2　人工衛星により撮影された SAR 画像の特徴.....49
4.3　崩壊地抽出手法.....51
4.4　既往災害への適用.....54
4.5　データ処理時間.....75
4.6　精度評価.....76
4.7　まとめと今後の課題.....89

第 5 章　人工衛星 SAR 画像を用いた河道閉塞判読に関する研究.....90
5.1　はじめに.....90
5.2　判読手法.....91
5.3　高分解能 SAR 画像の撮影条件の検討.....95
5.4　評価結果と判読に求められる撮影条件.....97

5.5　まとめ.....112

第 6 章　総合考察.....114
6.1　本研究で得られた成果.....114
6.2　人工衛星 SAR を用いた崩壊地抽出・判読手法と最大被害を推定する指標を組み合わせた初動時被害状況把握手法の提案と適用性の評価.....117
6.3　今後の研究課題.....120

第 7 章　結論.....122

謝辞.....125

引用文献.....126

第 1 章　緒論

1.1　広域土砂災害に対する取組と課題

我が国では近年，平成 23 年（2011 年）3 月の東日本大震災や同年 9 月の紀州半島大水害に代表される，大規模な地震・豪雨により，複数の都道府県に被害が及ぶような，被害が広範囲に及ぶ大規模な土砂災害（以下，広域土砂災害）が発生し甚大な被害が生じている。広域土砂災害は，深層崩壊の発生や河道閉塞の決壊による被害（例えば，国土技術政策総合研究所・土木研究所，2013；田畑ら，2002），土石流の同時多発的発生（例えば，古川ら，2009），災害発生後の長期的な土砂流出量の増加（例えば，Mark *et al.*, 2015）といった甚大な被害をもたらす場合がある。広域土砂災害の発生時には，交通・情報網の途絶のため被害状況の把握が困難な状況の下，崩壊による河道閉塞や土石流の同時多発等の甚大な人的・物的被害を生じる現象が含まれ，最悪の事態に備えるためには，迅速かつ精度の高い被害状況把握が重要である。

我が国において土砂災害対策を所管する国土交通省によると，地震については，東日本大震災以降，今後発生が懸念されている首都直下地震，南海トラフ巨大地震により広範囲に甚大な被害が及ぶことが懸念されており，国土交通省によって，それぞれの地震への対策計画が「首都直下地震対策計画」，「南海トラフ巨大地震対策計画」（国土交通省南海トラフ巨大地震・首都直下地震対策本部，2014a；2014b）として策定され，将来予測される巨大地震に起因する土砂災害への対策を講じることが記載されている。豪雨については，1970 年代から 1 時間 50mm 以上の降雨の回数の地球温暖化の影響と考えられる増加の傾向が見られ，土砂災害の発生件数も増加の傾向が見られている（国土交通省，2011a）。また，近年の災害事例と降雨の関係分析事例によると，大規模な土砂流出を引き起こす災害は，台風に伴う豪雨によって引き起こされている場合が多いとされている（例えば，Saito *et al.*, 2014）。将来的にも，「国土交通省気候変動適応計画」（国土交通省，2015）によると，今後も地球温暖化の進行による短時間強雨や大雨の発生頻度の増加，台風の激化等の気候変動に伴い，土砂災害の発生頻度の増加，台風等による記録的な大雨に伴う深層崩壊等の増加が懸念されており，将来予測される気候変動により激化する大規模な豪雨に起因する土砂災害への対策を講じることが記載されている。このように巨大地震の発生，記録的

大雨の発生頻度の増加等に起因して土砂災害の激甚化が想定される中で，広域土砂災害の発生の懸念が高まっており，国民の生命・財産を守るため減災・防災に取り組むことが土砂災害対策における重要な課題の一つである。

広域土砂災害に対する災害初動対応時においては，国土交通省による計画の策定（例えば，国土交通省砂防部，2008a；国土交通省南海トラフ巨大地震・首都直下地震対策本部，2014a；2014b）のみならず，「土砂災害防止法に基づく緊急調査」「TEC-FORCE による自治体支援」等の制度・運用に関する取組が進められている。

土砂災害防止法に基づく緊急調査については，平成 16 年 10 月の新潟県中越地震、平成 20 年 6 月の岩手・宮城内陸地震において河道閉塞が発生し、河道閉塞の決壊による下流域における甚大な土石流による被害が懸念された。河道閉塞のような大規模な土砂災害が急迫している場合、住民に対し避難指示をする役割を担う市町村では，避難指示の判断の根拠となる災害の想定される区域や発生時期に関する情報を技術的に判断し入手することが困難であったことを背景に，平成 23 年 5 月 1 日に土砂災害防止法が改正され，大規模な土砂災害が急迫している場合において、市町村長が適切に避難指示をできるよう、河道閉塞・火山噴火に起因する土石流及び河道閉塞による湛水については国土交通大臣，地滑りについては都道府県知事による緊急調査の実施，また，緊急調査に基づく土砂災害緊急情報の発表により，市町村長による避難指示等の判断に資する被害が想定される区域・時期の情報を提供することとなった。（全国治水砂防協会，2016）

TEC-FORCE（緊急災害対策派遣隊，国土交通省水管理・国土保全局，2016）は，大規模な自然災害等に際して、被災自治体が行う被災状況の迅速な把握、被害の拡大の防止、被災地の早期復旧等に対する技術的な支援を円滑かつ迅速に実施し，迅速に地方公共団体等への支援が行えるよう，平成 20 年 4 月に創設された。TEC-FORCE は国土交通省本省災害対策本部長の指揮命令のもと、全国の各地方整備局等の職員が活動し，被災自治体への地域支援を実施する。土砂災害においては，国土技術政策総合研究所，国立研究開発法人土木研究所の職員が土砂災害専門家派遣として技術的な支援を行い，また，地方整備局等の職員が土砂災害危険箇所の緊急点検を実施する。大規模土砂災害後の土砂災害危

険箇所の緊急点検については，例えば，平成 25 年 10 月の伊豆大島における土石流災害，平成 26 年 8 月の広島市での土砂災害において TEC-FORCE の活動の一環として実施されている。

一方で，災害対応の基礎となる情報である，河道閉塞や土石流の発生実態，及び，被害状況把握の遅れが制度・運用の支障の一つとなっている。例えば，東日本大震災後の土砂災害について，土砂災害発生状況の調査や危険箇所緊急点検等の被害状況の把握に時間を要したことが災害対策上の課題として指摘されている（国土交通省，2011b）。また，河道閉塞については，形成から決壊に至るまでの時間が 10 日以内となるものが多くあることが知られており（例えば，田畑ら，2002），初動時の河道閉塞の形成の把握の遅れが甚大な被害をもたらす可能性がある。

広域土砂災害の被害状況把握に関する既往研究は，航空レーザ測量（例えば，三浦・弓，2015）や無人飛行機（例えば，Wu *et al.*, 2013 ; Gomez and Purdie, 2016）等の個別の調査技術に関する研究が多くみられるものの，被害状況把握全体の課題や改善に着目した研究はほとんど報告されていない。本研究では，広域土砂災害の対応事例の調査から，①最大被害を推定する指標の作成，②河道閉塞や土石流の発生実態調査の時間短縮及び精度向上の二つが大きな課題であることを示し，①及び②を解決し，調査時間を短縮し最大被害を推定する手法を提示することを目的とした。

広域土砂災害の被害状況把握においては，①最大被害を推定する指標の作成，②河道閉塞や土石流の発生実態調査の時間短縮及び精度向上の二つが大きな課題となっている。①については，既往の対応事例においては，死者・行方不明者，崩壊土砂量等の個別の災害に特徴的な指標を過去の災害事例と比較することにより評価が行われており，被害状況の把握が進み特徴的な指標が決まるまで，最大被害を推定することが困難であるという課題がある。また，②については，現在，広域土砂災害に対する調査技術としてヘリコプター，人工衛星等の複数の調査技術が用いられているが，各技術の調査可能な面積等の調査能力・用途等の調査技術の特徴について比較・整理した事例はほとんどなく，調査の時間短縮及び精度向上を踏まえた，調査技術のより適切な活用について検討ができていない状況にある。以下，①及び②の現状について記載する。

1.2　最大被害を推定する指標

1.1 で述べたとおり，①最大被害を推定する指標の作成については，既往の対応事例では，個別の災害に特徴的な指標に関する調査結果を過去の災害事例と比較することにより評価が行われている。代表的な指標の例として，死者・行方不明者数（国土交通省砂防部保全課，2014），崩壊土砂量（国土技術政策総合研究所・土木研究所，2013），河道閉塞の箇所数（国土交通省砂防部砂防計画課，2008；国土交通省近畿地方整備局紀伊半島大水害記録誌事務局，2014）を挙げることができる。

1.2.1　死者・行方不明者数

死者・行方不明者数については，国土交通省砂防部保全課（2014）が，平成 26 年の 8 月の広島市での土石流災害（死者 74 名）の直後の平成 26 年 8 月 29 日に，過去に発生した降雨に伴う大規模な土砂災害について，一つの土砂災害として昭和 58 年島根災害における死者・行方不明者数（土砂災害）87 名，一回の降雨でかつ，一つの市町村で発生した土砂災害としては昭和 57 年長崎災害における死者・行方不明者数（土砂災害）長崎市 194 名（災害当時）（県内全体 220 名）以降最大の人的被害として発表し，死者・行方不明者数を指標として，土砂災害の社会的・経済的影響の大きさの参考となる指標として公表している（表－1.1）。表－1.1 から平成 23 年の紀伊半島大水害をはじめ，複数の都道府県に被害が及ぶような，広域土砂災害によって，大きな人的被害が生じていることが分かる。

表－1.1　過去に発生した降雨に伴う人的被害が大きい土砂災害（国土交通省砂防部保全課，2014 に加筆）

Table 1.1　Sediment disasters with huge human damage caused by heavy rain (After Land conservation division, SABO department, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, 2014)

	災害発生年月	都道府県名	土砂災害発生地区	災害原因	死者・行方不明者数
	S20.9	広島	呉市周辺	枕崎台風	1,154
	S22.9	群馬	赤城周辺	カスリーン台風	271
	S26.7	京都	亀岡周辺	前線	114
	S28.6	熊本	阿蘇山周辺	梅雨前線	102
	S28.7	和歌山	有田周辺	梅雨前線	460
	S28.8	京都	南山城・上野周辺	前線	336
	S33.9	静岡	狩野川周辺	台風 22 号	1,094
	S34.8	山梨	釜無川周辺	台風 7 号	43
	S36.6	長野	伊那谷周辺	集中豪雨	130
	S41.9	山梨	西湖周辺	台風 26 号	94
	S42.7	兵庫	表六甲	集中豪雨	92
	S42.7	広島	呉市周辺	集中豪雨	88
	S42.8	新潟	黒川村	集中豪雨	31
	S47.7	熊本	天草周辺	集中豪雨	115
	S49.7	香川	小豆島	台風 8 号	29
	S50.8	青森	岩木山	集中豪雨	22
	S50.8	高知	仁淀川周辺	台風 5 号	68
	S51.9	香川	小豆島	台風 17 号	119
	S53.5	新潟	妙高高原町	融雪	13
	S56.8	長野	宇原	台風 15 号	10
	S57.7	長崎	長崎市周辺	梅雨前線	220 （うち長崎市 194）
	S58.7	島根	三隅町・浜田市周辺	梅雨前線	87
	S60.7	長野	地附山	集中豪雨	26
	S61.7	鹿児島	鹿児島市周辺	梅雨前線	18
	S63.7	広島	加計町・戸河内町	集中豪雨	14
	H2.7	熊本	一の宮町	梅雨前線	13
	H5.8	鹿児島	鹿児島市周辺	8 月豪雨	64
※	H8.12	新潟・長野	糸魚川市・小谷村	融雪等	14
	H9.7	鹿児島	出水市針原地区	梅雨前線	21
	H11.6	広島	広島市・呉市	梅雨前線	24
	H15.7	熊本	水俣市	梅雨前線	19
※	H16.9	三重・徳島・香川・愛媛	東海西部・四国全般	台風 21 号	17
※	H16.10	長野・富山・岐阜・兵庫・京都・岡山・香川・愛媛	北陸・中部・近畿・中国・四国全般	台風 23 号	27
※	H17.9	鹿児島・宮崎・大分・山口	鹿児島・宮崎・大分・山口	台風 14 号	22
※	H18.7	長野他	関東・北陸・中部・近畿・中国・四国・九州	7 月豪雨	20
※	H21.7	山口他	防府市	豪雨	21
※	H23.8	和歌山他	那智勝浦町	台風 12 号	62
※	H24.7	熊本他	阿蘇市	豪雨	23
※	H25.10	東京他	伊豆大島	台風 26 号	40

※は，複数の都道府県に被害が及んでいる土砂災害の事例

1.2.2　崩壊土砂量

崩壊土砂量については，例えば，紀伊半島大水害による崩壊土砂量の合計は約 1 億 m^3 であると推定されており（森山ら，2011），この値が土砂災害の社会的・経済的影響の大きさの参考となる指標として公表されている。これは大雨による土砂災害として戦後最大の規模であったとされている（国土交通省砂防部，2011c)。また，国土技術政策総合研究所・土木研究所（2013）による，過去の大規模災害 19 事例の崩壊土砂量の比較によれば，平成 20 年岩手・宮城内陸地震，紀伊半島大水害等の，複数の都道府県に被害が及ぶような，広域土砂災害において，崩壊土砂量が多くなっている（表－1.2)。

表－1.2　過去に発生した崩壊土砂量が多い土砂災害（国土技術政策総合研究所・土木研究所（2013）に加筆）

Table 1.2 Sediment volume moved of past huge sediment disasters (After National Institute for Land and Infrastructure Management and Public Works Research Institute, 2013)

	No.	災害発生年月（西暦）	災害発生年月（和暦）	災害名	主な被災県	災害原因	崩壊土砂量
	1	1889.8	明治22年8月	十津川災害	奈良県	豪雨	約2億m^3
	2	1895.8	明治28年8月	ナンノ谷崩壊	岐阜県	豪雨	約150万m^3
	3	1911.8	明治44年8月	稗田山大崩壊	長野県	豪雨	約1億5000万m^3
	4	1938.7	昭和13年7月	阪神大水害	兵庫県	豪雨	約500万m^3
	5	1953.7	昭和28年7月	有田川災害	和歌山県	豪雨	約2,000万m^3
	6	1959.8	昭和34年8月	富士川昭和34年災害	山梨県	台風	約4,500万m^3
	7	1961.7	昭和36年7月	伊那谷三十六災害	長野県	豪雨	約7,300万m^3
※	8	1965.9	昭和40年9月	奥越豪雨	岐阜県、福井県	豪雨	約4,800万m^3
※	9	1967.7	昭和42年7月	羽越災害	新潟県、山形県	豪雨	約850万m^3
	10	1975.8	昭和50年8月	仁淀川災害	高知県	豪雨	約2,700万m^3
	11	1982.8	昭和57年8月	富士川昭和57年災害	山梨県	台風	約3,000万m^3
	12	1984.9	昭和59年9月	長野県西部地震（御岳崩れ）	長野県	地震	約3,400万m^3
	13	1995.1	平成7年1月	兵庫県南部地震	兵庫県	地震	約37万m^3
※	14	1995.7	平成7年7月	7.11姫川水害	長野県、新潟県	豪雨	約1,000万m^3
	15	2004.1	平成16年10月	平成16年新潟県中越地震	新潟県	地震	約1億m^3
※	16	2005.9	平成17年9月	台風14号（鰐塚山）	宮崎県他	台風	約680万m^3
※	17	2008.6	平成20年6月	平成20年岩手・宮城内陸地震	岩手県、宮城県	地震	約1億3000万m^3
※	18	2009.7	平成21年7月	平成21年7月中国・九州北部豪雨山口県防府市周辺	山口県他	豪雨	約235万m^3
※	19	2011.9	平成23年9月	台風12号（紀伊半島分）	奈良県、和歌山県、三重県	台風	約1億m^3

※は，複数の都道府県に被害が及んでいる土砂災害の事例

1.2.3　河道閉塞の箇所数

河道閉塞の箇所数については，例えば平成 20 年岩手・宮城内陸地震では 15 箇所（国土交通省砂防部砂防計画課，2008），紀伊半島大水害においては 17 箇所（国土交通省近畿地方整備局紀伊半島大水害記録誌事務局，2014）として，広域土砂災害の特徴的な指標の一つとして公表されている。

1.2.4　最大被害推定の課題

1.2.1 から 1.2.3 に示したように，既往の対応事例では，個別の災害に特徴的な指標に関する調査結果を過去の災害事例と比較することにより評価が行われており，被害状況の把握が進み特徴的な指標が決まるまで，最大被害を推定することが困難な状況にあり，この課題の解決のため，災害の現象的特徴に依存せず比較可能な指標の作成が最大被害の推定に必要であると考えられた。

1.3　広域土砂災害に対する調査技術の活用実態と課題

1.1 において述べたとおり，広域土砂災害に対する危機管理における災害初動対応を円滑に実施するためには，例えば，緊急調査では河道閉塞の形成の有無，TEC-FORCE の活動では土砂災害が集中して発生している地域といった，崩壊による河道閉塞や土石流の発生実態・被害状況把握を初動時に迅速に調査し把握することが，危機管理に関する人的資源・資機材の配分を適切に行うために重要である。広域土砂災害発生時に，どのような種類の調査技術が用いられたか，及び，調査結果については個別に多く記録がなされているものの（例えば，国土技術政策総合研究所・土木研究所，2011；国土技術政策総合研究所・土木研究所，2013），調査技術の調査能力を定量的に把握・比較し，評価を行った事例はほとんどない。また，被害の及んでいる可能性のある範囲・天候等の災害の発生状況，調査技術の特徴に基づいて，調査技術の組み合わせについて検討した事例もほとんどない。このため，より迅速な崩壊による河道閉塞や土石流の発生実態・被害状況把握ができるような，調査技術のさらに適切な活用方法について検討ができていない。

本項では，近年の広域土砂災害の事例として，平成 23 年に発生した東日本大震災（地震）と紀伊半島大水害（豪雨）の２つの誘因の異なる災害を取り上げ、

その初動時にどのような調査がどのような量で行われたか評価し、その結果に基づいて、初動時にどのように調査技術を組み合わせると効率的であるかについて考察を行う（林ら，2017a）。

1.3.1　対象災害の概要

調査の対象とした平成 23 年（2011 年）3 月の東日本大震災や同年 9 月の紀伊半島大水害の災害の概要について，以降述べる。

1)　東日本大震災

東日本大震災による土砂災害については，福島県白河市葉ノ木平地区における地すべり災害により 13 名の死者が生じた他，余震及び長野県北部地震，静岡県東部地震等の関連地震も含め，12 県において，土石流等 13 件，地すべり 29 件，がけ崩れ 97 件，雪崩 2 件の計 141 件の土砂災害が発生し，死者 19 名，人家全壊 28 戸，半壊 10 戸，一部損壊 39 戸の被害が発生した（国土交通省砂防部，2011a）。国土交通省ヘリコプターによる広域調査，土砂災害発生箇所への専門家の派遣等の TEC-FORCE による被災自治体支援が行われている（国土交通省，2011c）。

2)　紀伊半島大水害

平成 23 年 9 月の台風 12 号による紀伊半島大水害では，奈良・和歌山両県で 17 箇所の河道閉塞，和歌山県那智勝浦町において同時多発的な土石流が生じる等，特に紀伊半島に激甚な災害が発生した。21 道都県において，土石流等 94 件，地すべり 32 件，がけ崩れ 82 件の計 208 件の土砂災害が発生し，死者 49 名，行方不明者 13 名，人家全壊 99 戸，半壊 46 戸，一部損壊 45 戸の被害が発生した（国土交通省砂防部，2011a）。土砂災害防止法に基づく河道閉塞に対する緊急調査，TEC-FORCE による被災自治体支援が行われた（国土交通省近畿地方整備局紀伊半島大水害記録誌事務局，2014）。

1.3.2　初動時被害状況調査技術の種類と調査能力

それぞれの災害における初動時に用いられた調査技術の活用事例について，

種類と調査能力の把握のために文献調査を行った。本研究において，調査能力は 1 日あたりの調査面積，悪天候時・夜間の調査の可否で評価を行うこととした。調査面積については，各調査技術を用いて調査が行われたと推定される面積とした。また，調査日数・時間数については，調査に着手したと推定される日・時点から調査結果が公表された時点，もしくは，次の調査のための資料となった等の結果の活用が確認された日・時点までの期間としている。1 日あたりの調査面積については，調査面積を調査日数・時間数で除して求めている。

活用された調査技術は以下の 8 つの技術である。

・ヘリコプターによる調査
・航空写真
・航空レーザ測量
・人工衛星により撮影された光学画像
・人工衛星により撮影された SAR 画像
・無人飛行機
・土砂災害危険箇所の緊急点検
・災害報告

各技術の概要，調査の目的・内容，文献調査結果を以降記載する。

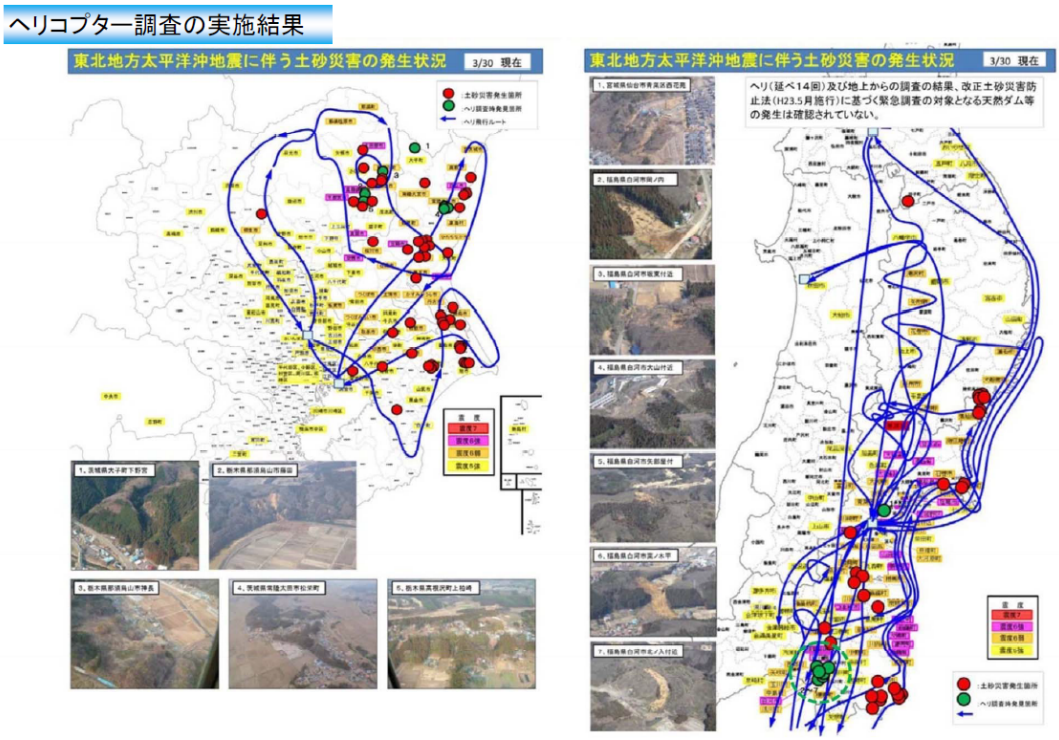
1) 防災ヘリコプターによる調査

a) 技術の概要，調査の目的・内容

国土交通省では，平成 28 年 9 月現在，全国に 8 機のヘリコプターを保有しており，土砂災害の発生した範囲・地震や豪雨後に被害の発生が予測される範囲の調査を実施する。例えば，国土交通省北陸地方整備局の「ほくりく号」（ベル式 412EP 型）は最大航続距離 736km，最大航続時間 4.21 時間の能力を有している（国土交通省北陸地方整備局，2016)。広域土砂災害の調査時においては，ヘリコプターから目視による土砂災害箇所の発見，写真・映像の撮影を行う。また，土砂災害の発生位置が確定している場合には，河道閉塞の監視等にも用いられる (例えば, 国土交通省近畿地方整備局紀伊半島大水害記録誌事務局, 2014)。ヘリコプターは有視界方式による飛行のため（国土交通省関東地方整備局，2013)，視界が確保できない悪天候時・夜間は調査ができない。

b)　東日本大震災における調査事例

東日本大震災のうち，平成 23 年東北地方太平洋沖地震において，地震によって土砂災害が発生しやすいとされている震度 5 弱以上の地域の面積は 56,747km^2 であった（小山内ら，2014）。国土交通省砂防部（2011b）によると，崩壊地分布・河道閉塞の形成の有無の把握のため，平成 23 年 3 月 12 日～4 月 12 日に延べ 23 回のヘリコプターによる調査が実施されており（図－1.1），市町村の内訳は明記されていないものの，点検対象となる震度 5 弱以上の 212 市区町村のうち，約 120 市町村について調査を実施した。調査結果としては，多数の土砂崩れを発見し，河道閉塞が発生するような大規模な斜面崩壊は確認されなかったと記録されている。この記録に基づくと，大まかな計算になるものの，1 回（＝1 日）あたりの調査面積は 1396.56km^2（56,747km^2÷212×120÷23）程度，有効数字を 2 桁とすると 1,400km^2 と推計される。



図－1.1　東日本大震災時の土砂災害に対する防災ヘリコプターによる調査の範囲と経路（(国土交通省，2011c）から抜粋）

Fig.1.1 Area and route of a prompt damage survey of the sediment disaster caused by the Great East Japan earthquake, using a helicopter (After Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, 2011c)

c）　紀伊半島大水害における調査事例

紀伊半島大水害におけるヘリコプターによる調査の事例としては，平成 23 年 9 月 6 日に河道閉塞形成状況調査が実施され，河道閉塞の湛水池の発生状況，越流侵食による水流の状況，崩壊地の規模等が調査されている（国土技術政策総合研究所・土木研究所，2013)。調査範囲は河道閉塞を発生させるような大規模な崩壊が存在した可能性のあった奈良県五條市・黒滝村・天川村・十津川村・野迫川村，和歌山県田辺市であり，この 1 日の調査範囲の市・村の総面積は 2369.75km^2 である，有効数字を 2 桁とすると 2,400km^2 である（図－1.2)。



図－1.2　紀伊半島大水害における河道閉塞形成状況調査の防災ヘリコプターによる調査の範囲と経路（国土技術政策総合研究所・土木研究所（2013）より抜粋）

Fig.1.2 Area and route of a prompt damage survey for searching landslide dams formed after the sediment disaster caused by Typhoon Talas, using a helicopter (After National Institute for Land and Infrastructure Management and Public Works Research Institute, 2013)

2)　航空写真

a)　技術の概要，調査の目的・内容

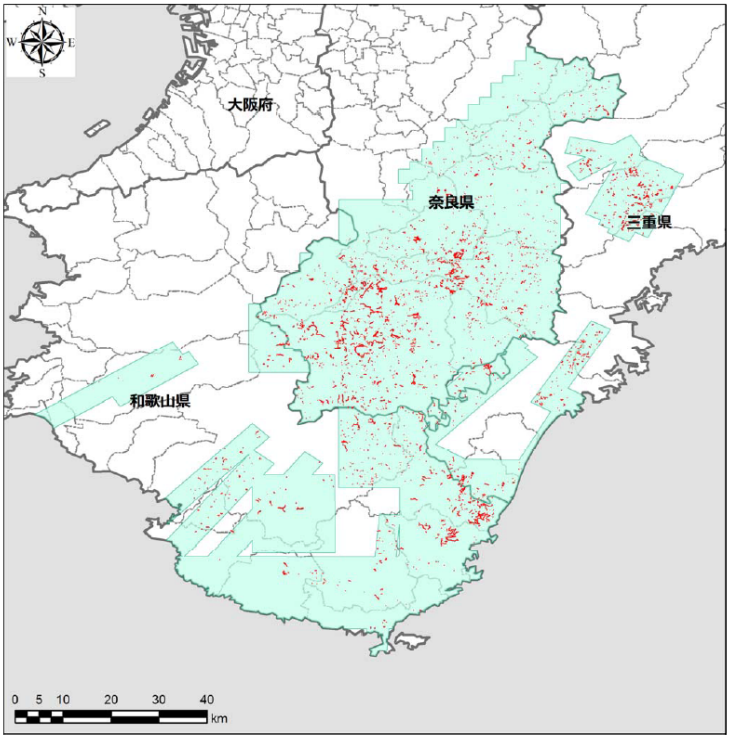
航空写真による調査は，固定翼・回転翼の航空機に設置されたカメラにより上空から写真を撮影し得られた地表の写真について，崩壊・土石流等の土砂移動現象を判読するものである。写真撮影のための航空機は，有視界方式による飛行のため，視界が確保できない悪天候時・夜間は撮影ができない。

b)　東日本大震災における調査事例

国土地理院によって，主に青森県～茨城県の沿岸部において航空写真の撮影，及び，写真の公開が行われているものの，土砂災害の被害状況調査に活用された事例の記録は見当たらない（砂防学会東北地方太平洋沖地震災害調査委員会，2013）。

c)　紀伊半島大水害における調査事例

森山ら（2011）によると，紀伊半島大水害による崩壊土砂量の合計は約 1 億 m^3 であると推定されている。この推定は，大半の範囲において航空写真の判読によって実施した（図－1.3）。判読範囲は約 48 億 m^2 である。国土交通省により災害調査の先遣班が派遣された平成 23 年 9 月 4 日（国土交通省近畿地方整備局紀伊半島大水害記録誌事務局，2014）を調査開始日とし，国土交通省砂防部（2011c）によるこの調査結果の記者発表の日である 10 月 11 日までの 38 日間を調査期間とすると 1 日あたりの調査面積は約 126.31km^2，有効数字を 2 桁とすると 130km^2 となる。



図－1.3　紀伊半島大水害における崩壊土砂量算出のための航空写真判読範囲（森山ら（2011）より抜粋）

Fig.1.3 Area of aerial photo interpretation for identifying the total amount of sediments moved due to sediment disasters caused by Typhoon Talas (After Moriyama *et al.*, 2011)

3)　航空レーザ測量

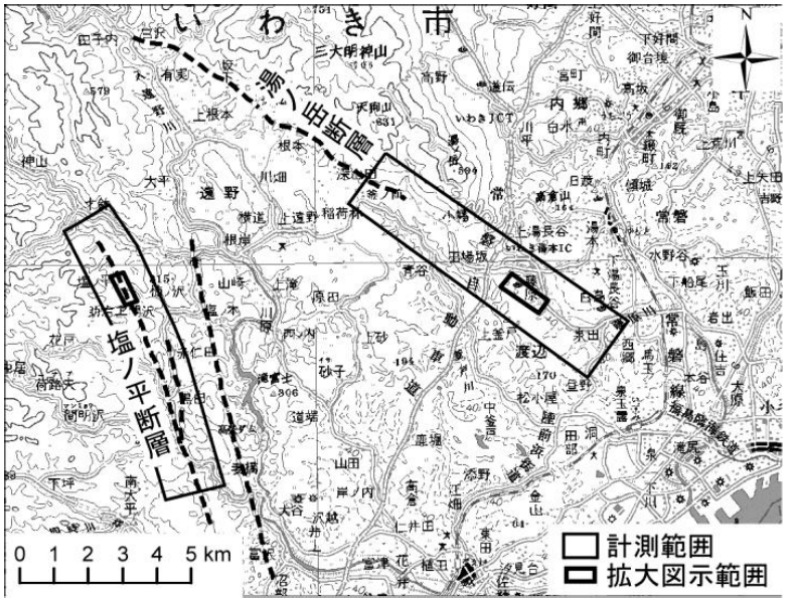
a)　技術の概要，調査の目的・内容

航空レーザ測量は，航空機から地上に向けてレーザを照射し，地表物・地物からの反射した時間差を計測するレーザ測距と GNSS 測量機・IMU（慣性計測装置）から得られた航空機の位置・加速度・角速度に基づくセンサの位置・姿勢情報を統合し，高精度の地形データを取得する調査技術である。航空レーザ測量では固定翼・回転翼の航空機が用いられ，1 日あたり百数十 km^2 の計測が可能とされている。飛行については，有視界方式による飛行のため，視界が確保できない天候時・夜間は撮影ができない。（国土地理院，2016；横尾，2014）

b)　東日本大震災における調査事例

砂防学会東北地方太平洋沖地震災害調査委員会（2013）によると，2011 年 4

月 11 日に福島県いわき市で発生したマグニチュード 7.0 の地震に対し，同年 5 月 18 日にいわき市内の湯ノ岳断層及び塩ノ平断層の周辺約 36km^2 の範囲において，朝日航洋によって航空レーザ測量が実施され，断層の動きに関する地形判読が実施されている（図－1.4)。



図－1.4　2011 年 4 月 11 日福島県いわき市で発生した地震に対する航空レーザ測量の計測範囲（砂防学会太平洋沖地震災害調査委員会（2013）より抜粋）

Fig.1.4 Area of Iwaki city, Fukushima Prefecture affected by an earthquake on April 11 th, 2011, as estimated using LIDAR (After the Great East Japan earthquake investigation committee of the Japan Society of Erosion Control Engineering, 2013)

c)　紀伊半島大水害における調査事例

木下ら（2012）によると，深層崩壊による河道閉塞のあった 8 地区（赤谷・長殿・栗平・北股・熊野・清水・坪内・三越）について，災害前と災害後の 2 時期の航空レーザ測量結果の差分解析により，土砂移動量の算出が行われている。解析の範囲は計 1.91km^2 である。この結果の一部は，国土交通省砂防部（2011c）による崩壊土砂量の合計に使用されており，国土交通省により災害調査の先遣班が派遣された平成 23 年 9 月 4 日を調査開始日とし，記者発表の日である 10 月 11 日までの 38 日間を調査期間と考えると，1 日あたりの調査面積は約 0.05km^2 となる。

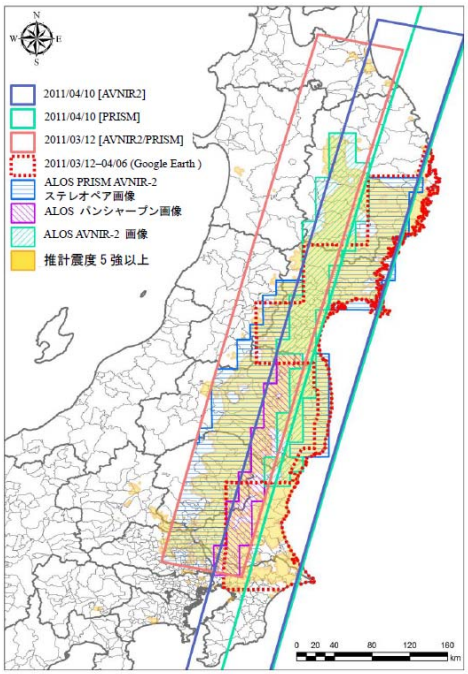
4) 人工衛星により撮影された光学衛星画像

a) 技術の概要，調査の目的・内容

人工衛星に搭載された光学センサにより受動的に可視光・赤外線を観測し，光学画像が撮影される。高い高度から撮影されるため，航空写真に比べ，一度に撮影される範囲は広い（例えば，小山内ら，2017a）。土砂災害調査時には，可視光の光学画像の判読を行う場合が多い。可視光を観測するため，雲の下・可視光の得られない夜間は撮影ができない。

b) 東日本大震災における調査事例

Mizuno *et al.*（2011），武士・水野（2012）によると，崩壊地分布の把握を目的に ALOS AVNIR-2 画像（分解能 10m），ALOS パンシャープン画像（分解能 2.5m），ALOS ステレオセット画像（分解能 2.5m），Google Earth コンテンツ用衛星画像に用いられている GeoEye-1 等の高分解能光学画像（分解能概ね 1m 以下）を用い，約 40,000km^2 の光学画像の判読を行い，崩壊地の抽出を行っている（図－1.5）。地震の翌 12 日から，調査結果が国土交通省砂防部（2011b）から公表された 6 月 6 日までの 87 日間の 1 日あたりの調査面積は約 459.77km^2，有効数字を 2 桁とすると 460km^2 となる。



図－1.5　東日本大震災時の土砂災害に対する光学衛星画像の判読範囲（武士・水野（2012）より抜粋）

Fig.1.5 Area covered in a prompt damage survey by interpreting optical satellite images against sediment disasters caused by the Great East Japan earthquake (After Takeshi and Mizuno, 2012)

c)　紀伊半島大水害における調査事例

国土交通省砂防部（2011c）の記者発表において崩壊土砂量の合計が約 1 億 m^3 と算出された際に，崩壊地判読の一部に衛星写真が使用されたとの記載があるものの（国土技術政策総合研究所・土木研究所，2013），調査面積については記載が見当たらなく不明である。

5)　人工衛星により撮影された SAR 画像

a)　技術の概要，調査の目的・内容

人工衛星に搭載された合成開口レーダー（SAR，Synthetic Aperture Rader の略）から地上に向け，斜めに照射されたマイクロ波の後方散乱波の強度を画像として記録することにより，SAR 画像は取得される。SAR 画像はその撮影方法からモノクロの鳥瞰図のような画像として取得される。合成開口レーダーのマイクロ波は雲を透過するため，悪天候・昼夜を問わず観測が可能である。衛星の周

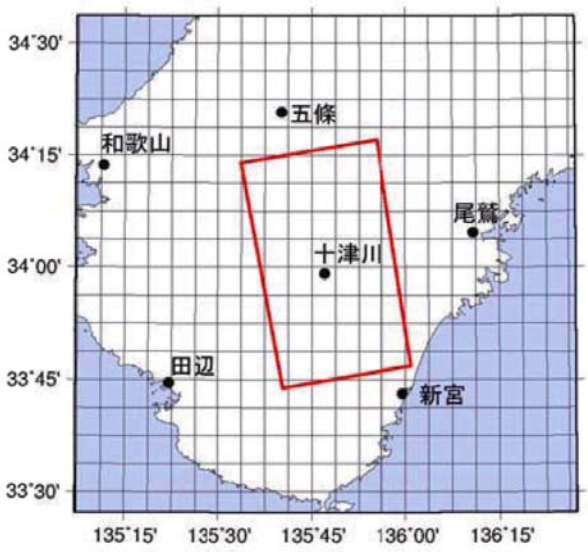
期・回帰日数・位置に影響をうける撮影頻度，衛星運用者・画像入手先の体制等により，撮影の依頼から画像の入手まで衛星によっては十数時間から数十時間かかる（水野ら，2013）。

b） 東日本大震災における調査事例

パスコによりドイツの衛星 TerraSAR-X による青森県～神奈川県の複数の SAR 画像（1 画像の範囲東西約 30km×南北約 50km，地上分解能 3m，StripMap モード）の撮影が行われているものの，土砂災害の被害状況調査に活用された事例の記録は見当たらない（砂防学会東北地方太平洋沖地震災害調査委員会，2013）。

c） 紀伊半島大水害における調査事例

紀伊半島大水害後に実施された防災ヘリコプターによる河道閉塞形成調査に先立って，高分解能 SAR 画像（衛星 TerraSAR-X，撮影範囲東西約 30km×南北約 50km，地上分解能 3m，StripMap モード）の判読により河道閉塞の位置の推定を行った（林ら，2012a）。約 1,500km^2 の範囲（図－1.6）について調査を実施し，観測計画の立案開始から国土交通省近畿地方整備局が判読結果を入手するまで約 29 時間を要した。1 日あたりの調査面積は 1,241.37km^2，有効数字を 2 桁とすると 1,200km^2 である。



図－1.6　紀伊半島大水害災害対応時 SAR 画像の撮影範囲（林ら（2012a）から抜粋）

Fig.1.6 Area covered in a prompt damage survey by using a SAR artificial satellite imagery against sediment disasters caused by Typhoon Talas (After Hayashi *et al.*, 2012a)

6)　無人飛行機

a)　技術の概要，調査の目的・内容

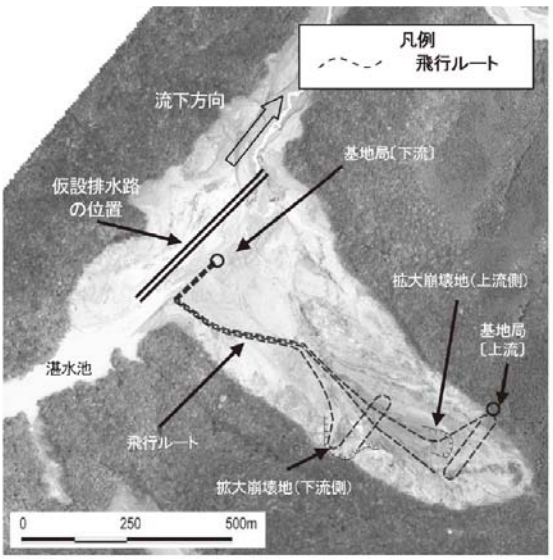
無人飛行機は，航空法では，人の乗ることができない飛行機，回転翼航空機，滑空機，飛行船であって，遠隔操作又は自動操縦により飛行させることができものと定義されており，日中の飛行・目視の範囲内での飛行等のルールの下に飛行させることとなっている（国土交通省航空局，2016)。土砂災害における災害調査においては，ドローン（マルチコプター）による写真・動画撮影による崩壊等の被災状況把握が行われる事例がある。また，ドローンから空撮画像の 3D 図化により，砂防堰堤への流出土砂量を計測している事例もある（小山内ら，2017b)。

b)　東日本大震災における調査事例

東日本大震災における土砂災害の被害状況調査に無人飛行機が活用された事例の記録は見当たらない。

c)　紀伊半島大水害における調査事例

木下ら（2013）は，奈良県五條市の赤谷地区の深層崩壊において，平成 24 年台風 4 号により発生した拡大崩壊の調査にドローンを用いている（図－1.7)。調査は，準備・撤収を含め，平成 24 年 6 月 27 日 9:00～17:00 に実施され，調査範囲は幅 450m，長さ 1,100m の範囲であり，調査面積は約 0.49km^2 である。



図－1. 10　赤谷地区におけるドローンによる調査の飛行ルート（木下ら（2013）から抜粋）

Fig.1.10 Route of a prompt damage survey by a drone on akadani landslide dam (After Kinoshita *et al.*, 2013)

6)　土砂災害危険箇所の緊急点検

a)　技術の概要，調査の目的・内容

地震・豪雨による大規模な土砂災害発生により二次災害の恐れがある場合において，国土交通省・都道府県によって，土砂災害危険箇所の緊急点検が実施される。緊急点検を実施する際は，早期に終了させるため，国土交通省・都道府県では地方整備局・都道府県間の応援等の特別な調査体制を構築する。緊急点検では，調査範囲の土砂災害危険箇所を網羅的に点検し，

・分類 A　変状が大きく，緊急的な工事等を行う必要がある箇所

・分類 B　変状が軽微で，詳細調査の実施後，必要に応じて工事等を行う箇所

・分類 C　当面，工事等を行う必要がない箇所

のように，危険度を 3 段階に分類して評価を行う（南・小山内，2014）。豪雨時・夜間を除いて実施される。

b)　東日本大震災における調査事例

震度 5 弱以上の地域の面積は 56,747km^2 である。この範囲には，32,392 箇所の土砂災害危険箇所があり，国土交通省砂防部（2011b）によれば，平成 23 年 6 月 6 日時点で 14 都県 212 市区町村の 31,374 箇所の点検が終了している。地震が発生した平成 23 年 3 月 11 日の翌 12 日から，6 月 6 日までの 87 日間を調査日数とすると，1 日あたりの調査面積は約 631.76km^2（56,747km^2×31,374÷32,392÷87），有効数字を 2 桁とすると 630km^2 となる。

c)　紀伊半島大水害における調査事例

紀伊半島大水害において，土砂災害危険箇所の緊急点検が実施された記録は見当たらない。

7)　災害報告

a)　技術の概要，調査の目的・内容

災害報告は，土砂災害の被害状況把握のために恒常的に運用されている制度であり，土砂災害発生時には，都道府県の砂防主管部局は国土交通省砂防部に災害の実態を調査し発生状況を報告することとなっている（全国治水砂防協会，2001）。国土交通省砂防部で集計され土砂災害の発生に係る公式な統計値となり，一般に公表される（例えば，国土交通省，2012；国土交通省，2016）。豪雨時・夜間を除いて，災害報告のための調査は実施される。

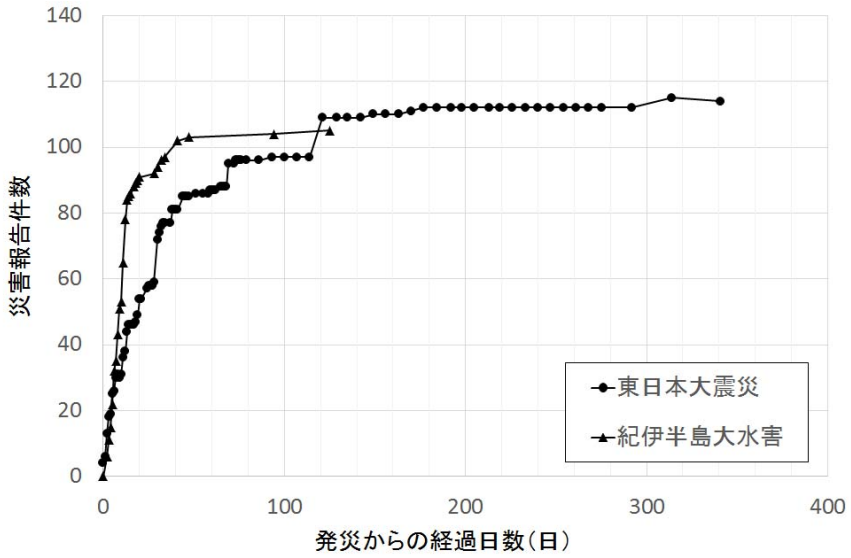
b)　東日本大震災における調査事例

国土交通省（2016）の記録に基づき，東日本大震災の発生（平成 23 年 3 月 11 日）からの経過日数と災害報告件数の関係を図－1.8 に示す。震度 5 弱以上の地域の面積は 56,747km^2 であり，災害報告件数の増加に変化がほぼ見られなくなる 121 日目までの 1 日あたりの調査面積は約 468.98km^2，有効数字を 2 桁とすると

470km^2 である。

c) 紀伊半島大水害における調査事例

国土交通省（2012）の記録等に基づき，紀伊半島大水害に対し国土交通省近畿地方整備局に災害対策本部が設置された平成 23 年 9 月 1 日（国土交通省近畿地方整備局紀伊半島大水害記録誌事務局，2014）からの経過日数と災害報告件数の関係を図－1.8 に示す。降雨が集中し，被害の著しかった紀伊半島の奈良・和歌山・三重 3 県の面積の合計は 14190.03km^2 であり，災害報告件数の増加に変化がほぼ見られなくなる 41 日目までを調査期間とすると，1 日あたりの調査面積は約 346.09km^2，有効数字を 2 桁とすると 350km^2 である。



図－1.8　東日本大震災と紀伊半島大水害における発生からの経過日数と災害報告件数の関係

Fig.1.8 Relationship between the number of disaster reports and days after the Great East Japan earthquake and sediment disasters caused by Typhoon Talas

1.3.3　結果と考察

1)　定量的評価に基づく初動時被害状況調査技術の組み合わせに関する考察

前項において実施した調査技術の活用事例に関する文献調査結果を調査能力の定量的評価として，1 日あたりの調査面積，悪天候時・夜間での調査の可否，

調査の項目について表－1.3 にまとめた。

実際の初動時の対応を念頭において，横軸には気象庁による週間天気予報が示される 1 週間（＝7 日間）のうちの晴天の日数をとり，縦軸には表－ 1 の各調査技術の 1 日あたりの調査面積の最大値を用いて晴天の日数に応じた 1 週間の調査面積を算出した値をとり，各調査技術の 1 週間の調査面積を図－1.9 に示す。無人飛行機については，1 日あたりの調査面積が他の調査技術に比べ小さいため図－1.9 には含めていない。

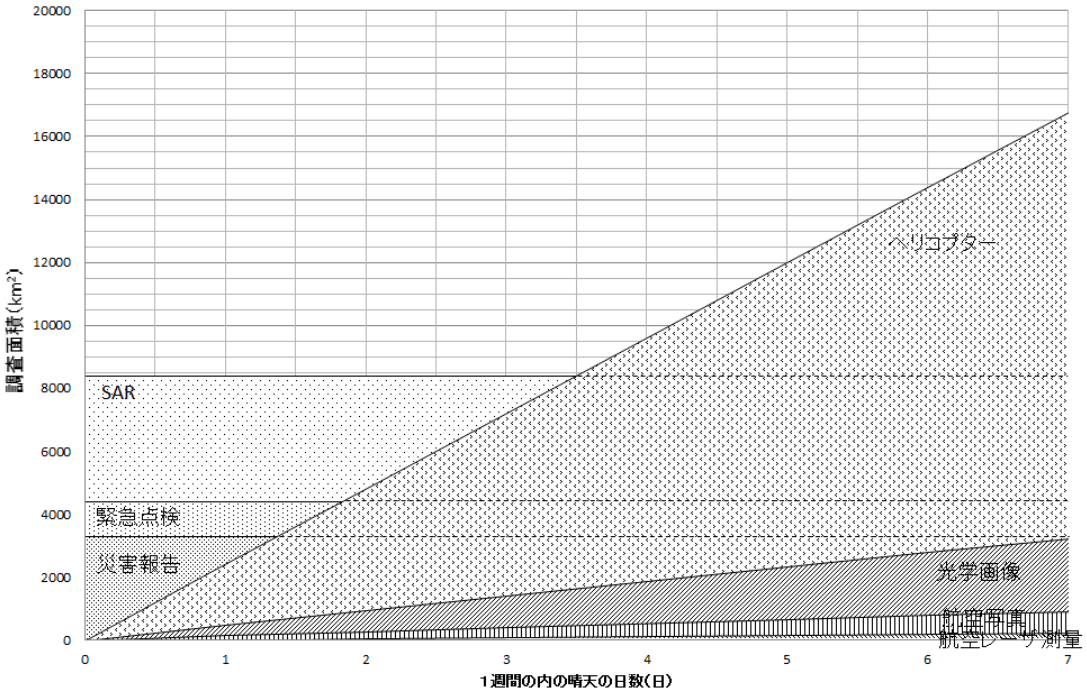
実際の初動時の対応では，ヘリコプターによる調査は国土交通省，土砂災害危険箇所の緊急点検・災害報告は国土交通省及び都道府県の自らの人的資源・資機材を用いて優先的に実施される。一方で，例えば，悪天候が続いた場合，これらの調査に悪天候時に調査可能な調査技術を組み合わせなければ，調査面積を広げることができず，迅速な被害状況の把握が困難となる。悪天候が続いた場合に，土砂災害危険箇所の緊急点検により 1 週間調査を継続した場合の調査面積は図－1.9 より約 4,400km^2 となる。これを基にすると影響範囲約 4,000km^2 以上となる場合が広域土砂災害となり得る目安と考えられる。

調査技術の定量的な評価に基づいて，図－1.9 のような図を作成することによって，向こう 1 週間の天候と被害が及んでいる可能性のある面積を指標に，調査技術の適切な組み合わせの選択を行うことが考えられる。本項での検討では，ヘリコプターによる調査と人工衛星により撮影された SAR 画像（以下，人工衛星 SAR）を用いた調査の組み合わせが，悪天候時・夜間に調査が亘る場合においても，一週間の調査面積を約 8,400km^2 と最大化できることを明らかにした。

表－1.3　東日本大震災と紀伊半島大水害における初動時被害状況調査技術の活用事例に基づく調査能力

Table 1.3 Investigation ability of prompt damage survey techniques based on actual usage against the Great East Japan earthquake and sediment disasters caused by Typhoon Talas

調査技術	文献	調査面積（A）	調査日数 もしくは 調査時間数（D）	1日あたりの 調査面積 （A/D）	悪天候時・夜間での 調査の可否
ヘリコプターによる調査	東日本大震災： 国土交通省河川局砂防部（2011c） 紀伊半島大水害： 国土技術政策総合研究所・土木研究所（2013）	東日本大震災： 32,121km^2 紀伊半島大水害： 1機あたり 2369.75km^2	東日本大震災： 23回（＝23日） 紀伊半島大水害： 1回（＝1日）	2,400km^2 ～ 1,400km^2	×
航空写真	紀伊半島大水害： 森山ら（2011）	4,800km^2	38日	130km^2	×
航空レーザ測量	東日本大震災： 砂防学会太平洋沖地震災害調査委員会(2013) 紀伊半島大水害： 木下ら（2012）	東日本大震災： 36km^2 紀伊半島大水害： 1.91km^2	東日本大震災： 1回（＝1日） 紀伊半島大水害： 38日	36km^2 ～ 0.050km^2	×
人工衛星により撮影された光学画像	東日本大震災： Mizuno et. al.（2011），武士・水野（2012）	40,000km^2	87日	460km^2	×
人工衛星により撮影されたSAR画像	紀伊半島大水害： 林ら（2012a）	1,500km^2	29時間	1,200km^2	○
無人飛行機	紀伊半島大水害： 木下ら（2013）	1機あたり 0.49km^2	1日	0.49km^2	×
土砂災害危険箇所の緊急点検	東日本大震災： 国土交通省砂防部（2011b）	54,964km^2	87日間	630km^2	△ （豪雨時・夜間は除く）
災害報告	東日本大震災： 国土交通省（2016） 紀伊半島大水害： 国土交通省（2012）等	東日本大震災： 56,747km^2 紀伊半島大水害： 14,190km^2	東日本大震災： 121日 紀伊半島大水害： 41日	470km^2 ～ 350km^2	△ （豪雨時・夜間は除く）



図－1.9　1 週間の内の晴天の日数と 1 週間の各初動時被害状況調査技術の調査能力（無人飛行機は除く）

Fig.1.9 Relationship between the number of fine days in a week and 1-week investigation ability of prompt damage survey techniques (Except drone)

2)　初動時被害状況調査技術の調査の項目に基づく組み合わせに関する考察

先に述べたとおり，調査技術によって，得られる情報が異なることから，調査技術の特徴に応じて調査の項目は異なっていると考えられる。

調査の項目から調査技術の特徴について，整理すると，調査技術は，崩壊地分布・河道閉塞形成の有無の把握を行う概略的な調査技術と崩壊土砂量の算出・断層の動きの把握・拡大崩壊の状況把握・土砂災害危険箇所の危険度の評価・土砂災害の発生状況を行う詳細な調査技術として大別することができる（表－1.4）。表－1.3，図－1.9 で分析を行った被害が及んでいる可能性の範囲の広さを項目に加え，調査技術について，表－1.4 のとおり整理を行った。表－1.4 のような整理を実施することにより定性的ではあるものの，調査技術の調査の項目・調査能力に基づいた調査技術の選択の目安とすることができると考えられ

る。表－1.4 によると，図－1.9 において調査面積を最大化できる調査技術と評価した人工衛星 SAR を用いた調査は，判読により崩壊地分布・河道閉塞形成の有無の把握を行える概略的な調査技術であることが分かる。図－1.9，表－1.4 を踏まえると，人工衛星 SAR について，河道閉塞や土石流の発生実態調査の時間短縮及び客観性・再現性の高い調査手法を検討し精度向上を図ることが，広域土砂災害の被害状況把握において有効であると考えられる。

表－1.4　初動時被害状況調査技術の調査の項目・調査能力に基づいた調査技術選択の目安

Table 1.4 A reference for selecting the appropriate prompt damage survey techniques based on purpose and affected area

	被害の及んでいる可能性の範囲	広域	局所的
概略的な調査技術	防災ヘリコプター	○	○
	光学衛星画像	○	
	SAR衛星画像	○	
詳細な調査技術	災害報告	○	○
	土砂災害危険箇所の緊急点検	○	○
	航空写真	○	○
	航空レーザ測量	○	○
	無人飛行機		○

1.3.4　まとめと今後の課題

広域土砂災害の代表事例として平成 23 年に発生した東日本大震災，紀伊半島大水害における調査技術の活用事例について文献調査を実施し，調査技術の定量的評価を試みた。また，実施した定量的評価に基づいて，調査技術の適切な組み合わせについて考察を行った。以下，明らかにした事項について記載する。

・東日本大震災，紀伊半島大水害における調査技術の活用事例について文献調査を実施し，広域土砂災害に用いる調査技術の定量的評価を行った（表－1.3）。

・定量的評価結果を踏まえ，被害のおよんでいる可能性のある範囲と天候に基

づいて，調査面積を最大にする調査技術の組み合わせを明らかにした（図－1.9）。

・調査の項目に着目し，調査技術の特徴・被害のおよんでいる可能性のある範囲に着目し，調査技術の選択する際の目安となる表を作成した（表－1.4）。

・上記の検討により，人工衛星 SAR について，河道閉塞や土石流の発生実態調査の時間短縮及び客観性・再現性の高い調査手法を検討し精度向上を図ることが，広域土砂災害の被害状況把握において有効であると考えられた。

今後の課題としては，今回の検討は，少ない事例に基づくものであり，更なるデータの蓄積による精度向上が必要である。また，土砂災害危険箇所の緊急点検や災害報告の調査の効率については，従事する職員数，交通途絶の状況等の対象地域の調査の容易さにより，ある程度変化するものと考えられるが，現時点で入手可能な資料では評価が困難であり，本項では議論ができていない。

第 2 章　研究方法

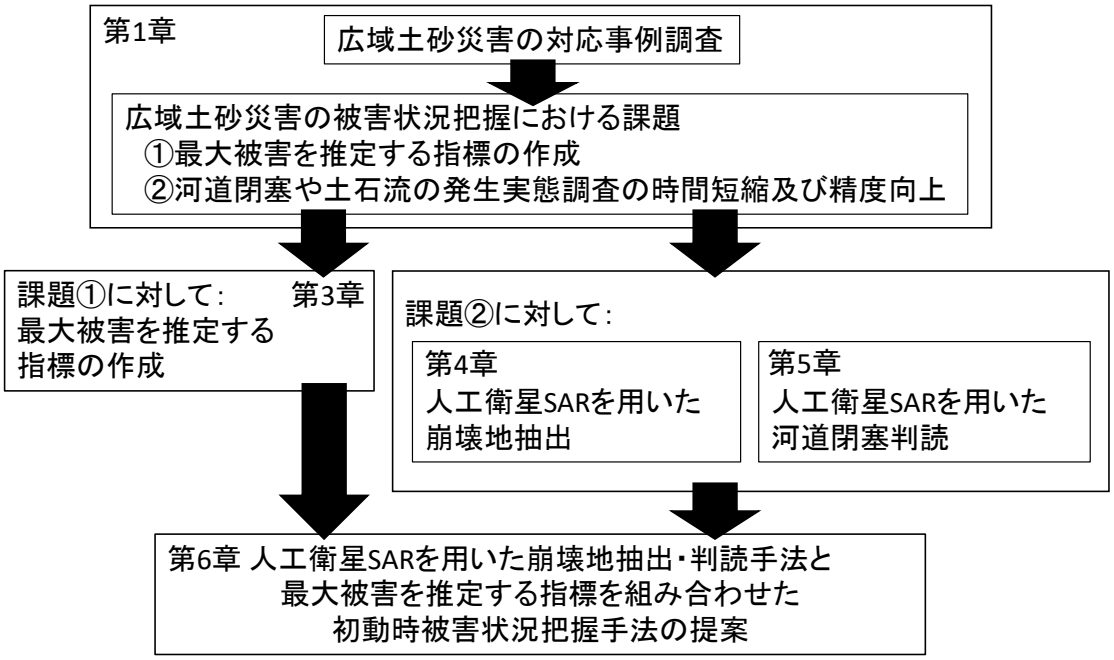
研究方法を図－2.1 に示す。本論文の構成と概要は以下のとおりである。

これまで第 1 章では，広域土砂災害の既往対応事例に関する調査から，広域土砂災害の被害状況把握における課題として，①最大被害を推定する指標の作成，②河道閉塞や土石流の発生実態調査の時間短縮及び精度向上の二つが大きな課題であることを示した。本研究では，①及び②を解決し，調査時間を短縮し最大被害を推定する手法を提示することを目的とし，以降各章において課題解決及び手法の提示のための検討を実施している。

第 3 章では，課題①に対して，最大被害を推定する指標の作成に関する研究を実施した。課題②に対して，第 4 章では，人工衛星 SAR を用いた崩壊地抽出手法，第 5 章では，人工衛星 SAR を用いた河道閉塞箇所判読手法に関する研究を実施した。

第 6 章では，総合考察として，第 3～5 章までの検討結果を組み合わせ，人工衛星 SAR を用いた崩壊地抽出・判読手法と最大被害を推定する指標を組み合わせることにより，広域土砂災害に対し，短時間に最大被害を推定する被害状況把握手法の提案，及び，その妥当性の評価を行う。

最後に，第 7 章において，結論として，研究によって得られた成果を総括する。



図－2.1　研究方法

Fig. 2.1 Research methods

第 3 章　最大被害を推定する指標の作成に関する研究

3.1　はじめに

1.1 及び 1.2 で述べたように，広域土砂災害において，最大被害を推定する指標の作成によって，速やかに最大被害を推定することができれば，国・地方自治体等の災害対応を実施する機関では適切な危機管理・応急対応を実施するための判断材料にできるため，投ずるべき人的・物的資源の迅速な決定が可能となり，災害初動対応を実施する機関の危機管理能力の向上が見込まれる。

加えて，リスクコミュニケーションの手法の一つとして，一般・マスコミに対して，最大被害の推定に関する情報を提供することにより，災害の深刻度や生活への影響を分かりやすく伝えることが可能となる。また，行政機関等の災害対応に関して一般・マスコミからの理解を得やすくなることが考えられる。

また，このような手法は，日本のみならず，諸外国，特に発展途上国において，土砂災害の社会・経済的影響を国内及び国外へ対外的に説明する際に有効であると考えられる。

既に，地震・竜巻・火山活動・雪崩・台風等の自然災害や火災・原子力事故等の人為的災害においては，災害を引き起こした現象，もしくは，被害を定量的に指標（以下，指標）化し，災害の社会・経済的影響を迅速に把握することにより災害対応に活用されている。代表的な指標の事例を表－3.1 に示す。

表－3.1　災害・事故及び災害を引き起こした自然現象の規模を定量的に表した指標（内田ら，2005）

Table 3.1 Indexes for describing the magnitude of major kind of disaster (After Uchida *et al.*, 2005)

Type of phenomena	Name of index	Quantity expressed	Numbers of levels of scale	Category
Earthquake	Magnitude	Energy of earthquake	Continuous variable	Type I
	Seismic intensity	Converting intensity of shake into numerals	10	Type II
Tornado	Fujita scale	Maximum wind velocity and duration	6	Type II
Volcanic activity	VEI (Volcanic Explosivity Index)	Logarithm of volume of tephra	9	Type I
	Volcanic eruption magnitude	Logarithm of volume of magma	8	Type I
Avalanche	Avalanche magnitude	Logarithm of product of mass and fall of avalanche	9	Type II
Typhoon	Intensity	Maximum wind velocity	2	Type I
	Size	Radius of strong wind zone (wind velocity above 15m/sec.)	3	Type I
Fire		Burnt area	7	Type III
Nuclear hazard	INES (International Nuclear Event Scale)	Effect for outside of facility (Logarithm of emission volume of radioactive substances) Effect for inside of facility (Degree of workers' exposure to radiation)	9	Type III

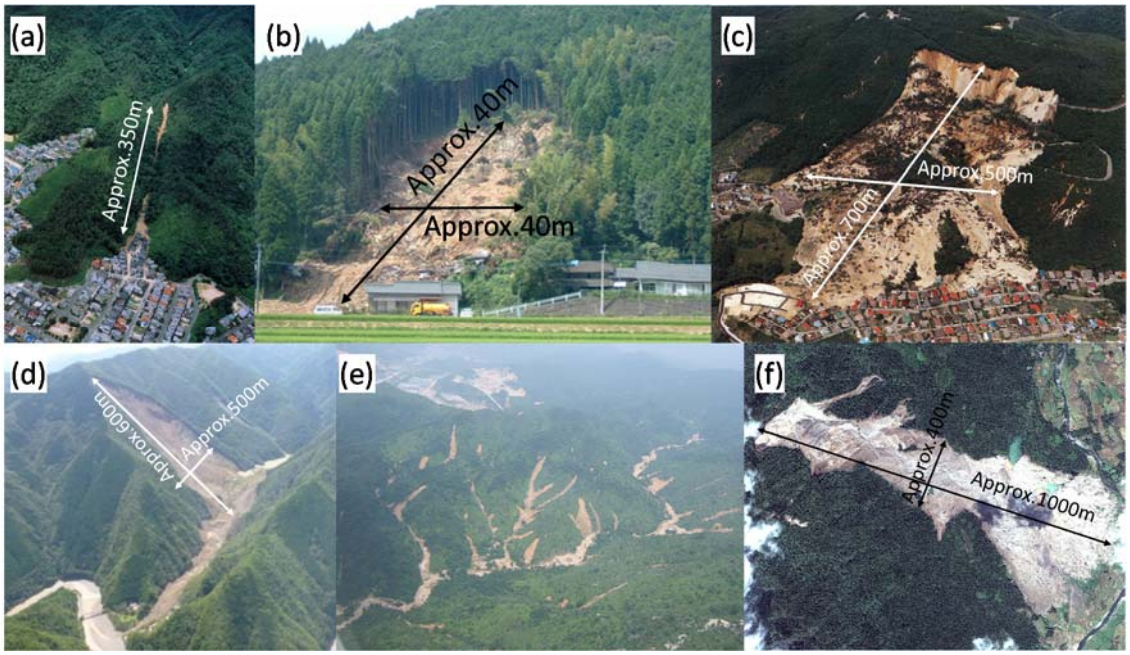
土砂災害では，1.2 に示したとおり，被害の定量化については，死者・行方不明者数，崩壊土砂量等の個別の災害に特徴的な指標を用いて説明が行われることが多く，一般に広く用いられる土砂災害の規模を評価する共通の指標は無い状況にある。

土砂災害の規模を定量的に指標化する際にはいくつかの課題がある。第一に，例えば，土石流（写真－3.1(a)），がけ崩れ（写真－3.1(b)），地すべり（写真－3.1(c)），深層崩壊（写真－3.1(d)）等，土砂災害が多様な土砂移動現象の形態をとるという特徴を有することが挙げられる（例えば，Sidle and Ochiai, 2006）。このため，例えば，崩壊地面積，崩壊土砂量，崩壊や土石流の発生数等が代表的な土砂移動現象の特徴として，記録に残されている（例えば，Hübl *et al.*, 2002）。上記の理由から，多様な特徴を持つ土砂移動現象を単一の指標を用いて土砂災害の規模を定量的に指標化することが困難であると言える。さらに，ある地域における土砂災害の発生は，地形・地質・気候・崩壊の発生形態・土砂の移動形態・土砂移動の規模等の地域特有の素因及び誘因に強く影響され，多岐にわたることになる。このような，条件の下，異なる地域の土砂災害の規模を定量的に指標化することは，土砂移動現象を単一の指標を用いて，その比較するだけでは困難であると言える（以下，課題 a と呼ぶ）。

第二に，一度の土砂災害における，土砂移動現象の数，規模が大きく異なることが挙げられる（写真－3.1）。例えば，崩壊に伴う土砂移動の規模は数 m^3 から 1 億 m^3 程度と幅が広い（例えば，Guzzetti *et al.*, 2009：Larsen *et al.*, 2010）（写真－3.1(b)から(f)）。土石流についても同様に土砂移動の規模の幅は広い傾向が見られる（例えば，Iverson，1997：Nishiguchi *et al.*, 2012）。また，１つの降雨イベントにより小規模な崩壊が大量に発生する場合もある（例えば，西ら, 2009）（写真－3.1(e)）。一方で１つの降雨イベントにより１つの大規模な崩壊が引き起こされる事例もある（例えば，Evans *et al.*，2007）（写真－3.1(f)）。例えば，2009 年に発生した防府市での土砂災害を評価した場合，１つ１つの崩壊・土石流は小さいが，防府市での同時多発的な崩壊・土石流を１つのイベントとして評価すると大きな災害として評価されうる。対象とする範囲によって被害の大きさが異なることから，対象とする範囲の設定が土砂災害の規模を定量的に指標化するための大きな課題の一つである。（以下，課題 b と呼ぶ）。

第三に，保全対象との位置関係等の土砂移動の発生位置に被害の大きさが依存するという課題がある（以下，課題 c と呼ぶ)。例えば，土砂移動の規模として小さい現象であったとしても，谷出口・斜面下部に住宅が密集している箇所において土石流が直撃した場合には甚大な被害が生じる（写真－3.1(a)）。一方で土砂移動の規模は巨大であるものの，周辺に人家がない場合には人的・物的被害が生じない（写真－3.1(d)）。

課題 a から c を踏まえると，土砂移動と被害の両方の評価に基づく指標の作成が重要であると考えられる。



(a) Debris flow (1999, Hiroshima city, Japan), (b) Shallow landslide (2006, Hishikari town, Kagoshima prefecture, Japan), (c) Deep-seated slow landslide (1985, Jizukiyama, Nagano city, Japan), (d) Deep-seated catastrophic landslide (2011, Akadani, Gojo city, Nara prefecture, Japan), (e) Multiple landslides and debris flows (2009, Hofu city, Yamaguchi prefecture, Japan), (f) Single huge landslide (2006, Guinsaugon, Leyte Island, the Philippines)

写真－3. 1　様々な発生形態と多様な土砂移動形態から引き起こされる土砂災害

Photo 3.1 Sediment disasters triggered by various processes and/or types of sediment movement

土砂災害の規模を定量的に指標化する手法については，内田ら（2009），小嶋ら（2009）等のいくつかの手法は先行研究としてあるものの，限られた災害事

例についてのみ検討されたものであり，上記の 3 つの課題を解決し，汎用性のある指標であることが確認されていない。

本章では，上記の 3 つの課題を解決し，広域土砂災害の初動時被害状況の調査結果から，土砂災害の規模を定量的に指標化し，最大被害を推定する指標の作成について研究を行った（Hayashi *et al.*, 2015）。

3.2　指標の作成手法

3.2.1　既往研究

土砂災害の規模を定量的に指標化する手法の先行研究である内田らの研究によると，災害の規模を定量化した指標は以下の３つのタイプに分類される（表－3.1）。

タイプ１：自然現象の規模を表す主要な１つの物理量

タイプ２：複数の物理量から算出される値

タイプ３：被害の規模を表現する指標

タイプ１及び２の指標は，自然災害において一般的に用いられている。一方，タイプ３の指標は火災，原子力事故等，人為的災害において用いられている。

内田らは，土砂災害のタイプ１の指標の例として「流出土砂量」について検討しているものの，土砂移動形態に評価結果の大小が依存するとしている。そのため，流出土砂量のようなタイプ１の指標は，課題 a を解決できず，複数の土砂移動形態に起因する土砂災害の規模を比較する指標として不適であるとしている。

内田らは，課題 a，b を解決するため，タイプ２の指標として，土砂の移動した比高と流出土砂量を乗じて得られる「土砂移動マグニチュード」を指標として用いることを提案している。また，課題 c について述べたように，土砂災害では人家・砂防堰堤等の防災施設の有無で被害が大きく異なることから，タイプ３の被害の規模を表現する指標を併せて用いることが必要であるとしている。すなわち，内田らの研究では，土砂災害の規模を統一的に定量評価するためには，タイプ２とタイプ３の指標を組み合わせることで定量評価できる可能性が示されている。

タイプ３の指標として，内田らは家屋被害に基づいた指標である「土砂災害

レベル」を提案している。内田らの研究を踏まえ，小嶋ら（2009）は，家屋被害のみの評価では，実際に一般の人々が受ける災害の印象を正確に反映できていないとして，新たにタイプ３の指標として，「被害レベル」を提案している。

以下に先行研究である内田ら，及び，小嶋らの研究を概説する。

1) 内田ら（2005）の指標

内田ら（2005）は，土砂移動量や土砂の移動した比高差といった，災害後に情報を得やすい簡素な情報を用いて，土砂移動の規模を示す指標の作成を試みている。内田らによると，タイプ１の簡素な指標では，多様な土砂移動形態をとる土砂移動現象の規模を評価するのは困難であるとしている。例えば，「流出土砂量」を指標とした場合，地すべり災害はがけ崩れ災害を常により深刻な災害であると評価されてしまうことになる。流出土砂量は，単一の土砂移動形態の中において，災害の規模を特徴づける指標とはなり得るものの，異なる土砂移動形態による災害の規模を比較する指標としては適していないと考えられる。タイプ１の指標は，課題 a を解決するためには，不適な指標であると言える。

課題 a と課題 b を克服するために，内田らはタイプ２の指標として，「土砂移動マグニチュード」を提案している。土砂移動マグニチュードは，土砂移動によって失われた位置エネルギーに関連した指標となっている。土砂移動マグニチュードは以下の式で表される。

$$M = log(\sum_{i=1}^{n}(V_i \times H_i)) \qquad (1)$$

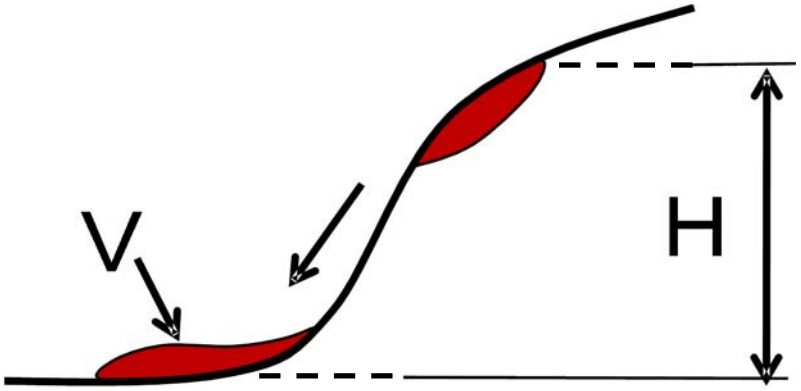
ここで，M：土砂移動マグニチュード（Sediment Movement Magnitude），V：土砂移動量（m^3），H：土砂の移動した比高差（m），n：土砂災害を引き起こした土砂移動の箇所数（図－2.1）。

内田らは課題 c を解決するタイプ３の指標として，土砂災害レベルを提案している。土砂災害レベルは以下の式で表される。

$$L = N_a + N_h + N_p \qquad (2)$$

ここで，L：土砂災害レベル，N_a：全壊家屋数，N_h：半壊家屋数，N_p：一部損壊家屋数。

内田らは，土砂移動マグニチュードと土砂災害レベルの間には関係性は無いことを確認している。地震や火山災害によって影響を受ける範囲に比べ，土砂災害によって影響を受ける範囲は限定的であり，そのため，人口密度・砂防施設の整備状況等の土砂災害によって影響を受ける範囲の状況に応じて，土砂移動マグニチュードが同じであっても，生じる被害は大きく異なることを指標においても示していることとなる。このことは，課題 c が土砂災害の規模に関する指標を考える上で重要な問題であることを示唆している。



H indicates the relative height between the origin of debris flow and the point of deposition (in the case of a debris flow), relative height between the top of a failure slope and the point of deposition (slope failure) or the height of the scarp (deep-seated slow landslide).

図－3.1　土砂移動マグニチュードの概要

Fig. 3.1　Outline of sediment movement magnitude

2)　小嶋ら（2009）の指標

内田らの土砂災害レベルでは，土砂災害によって生じた家屋被害数のみに基づいて指標化が試みられており，死者数・負傷者数は考慮されていない。小嶋ら（2009）は，内田らの土砂災害レベルは，死者数・負傷者数を踏まえて一般住民が災害から受ける印象と大きく異なっていることを指摘している。

これに対し，小嶋らは，内田らの土砂災害レベルに代わる人的・物的被害を

示す指標として，被害レベルという指標を提案している。小嶋らは，土砂災害の生じた県の職員に土砂災害から受ける印象の強さについて，聞き取り調査を行い，その結果について，印象の作られる主要な要因について分析を行っている。聞き取り調査結果に対する多変量解析から，小嶋らは 4 つの変数に基づく回帰式を作成し，回帰式から被害レベルという指標を算出することを提案している。指標作成の過程から被害レベルは，災害の発生した地域における短期的な社会・経済的な影響を表現した指標であると考えられる。被害レベルは以下の式(3)で算出される。

$$D = 0.69 \times log(x_1) + 0.16 \times log\left(x_2 + x_3 + {}^{x_4}/_{3}\right) \qquad (3)$$

ここで，D：被害レベル，x_1：死者・行方不明者数，x_2：負傷者数，x_3：全壊家屋数，x_4：一部損壊家屋数，ただし，右辺の各括弧内が 0 である場合，第 1 項に 0.3 と第 2 項に 0.1 を代入する。

3.2.2　評価手法の考え方

本研究では，内田ら及び小嶋らの研究を踏まえ，課題 a～c を解決した指標として，土砂移動マグニチュードと被害レベルの組み合わせにより，土砂災害の規模を評価する指標について検討を行った。

具体的には，土砂移動の規模を示す指標として「土砂移動マグニチュード（SMM，タイプ２の指標)」を横軸に，人的・物的被害を示す指標として「被害レベル（DL，タイプ３の指標)」を縦軸に組み合わせ，両指標の組み合わせを 5 段階のカテゴリー（Ⅰ～Ⅴ）に区分して土砂災害の規模を評価する手法「土砂災害スケール」について検討を行った。

3.2.3　検討に使用したデータ

土砂移動マグニチュード, 及び, 被害レベルの算出のためのデータとして,「がけ崩れの実態」（門間ら，1999）のデータを用いた。がけ崩れ災害の実態には，1972 年から 1997 年までのがけ崩れ災害 10,686 件のデータが収録されている。がけ崩れ災害の実態に加え，さらに，土砂移動現象の発生形態・規模の異なる

土砂災害の事例のデータを追加するため，災害調査報告書及び既往研究論文等の文献調査を実施し，日本国内及びアジア地域での災害事例を以下のとおり追加した。

・土石流災害の事例として，長野県　的場沢，小田井沢，志平沢の事例（平松ら，2006）
・地すべり災害の事例として長野県　地附山の事例（長野県, 2015）（写真－2.1(c)）
・深層崩壊に起因する土石流の事例として　針原川の事例（森脇ら，1998），集川の事例（国土技術政策総合研究所・土木研究所，2003），及び，大用知の事例（日浦・笹原，2005）
・同時多発的ながけ崩れ災害及び土石流災害の事例として，出雲崎の事例（野呂ら，2004）新居浜の事例（砂防・地すべり技術センター，2005），防府の事例（林ら，2010）（写真－3.1(e)）
・同時多発的ながけ崩れ災害，地すべり災害及び土石流災害の事例として宮川（林ら，2004）
・同時多発的な深層崩壊による災害及び土石流災害の事例として，宮崎県の事例（宮崎県，2005），岩手宮城内陸地震の事例（宮城県，2008；地盤工学会，2010）

アジア地域での災害事例として，

・深層崩壊による災害の事例として，インドネシア・バワカラエン山（土屋ら，2004）の事例，フィリピン・レイテ島のギンサウゴン村の事例（小荒井ら，2008）

を追加した。

さらに，本研究においては，以下の事例について，土砂移動現象については人工衛星により撮影された光学衛星写真及び航空写真により分析を行い，人的・物的被害に関する情報については資料収集により収集し，事例として追加を行った。

・同時多発的ながけ崩れ，深層崩壊による災害及び土石流災害の事例として紀伊半島大水害の事例
・土石流災害の事例として　大韓民国・インジェ市（写真－3.2）及びピョンチャン市（写真－3.3）の事例
・同時多発的ながけ崩れ及び土石流災害の事例として大韓民国・ソウル市（写真－3.4）の事例



写真－3.2　大韓民国・インジェ市における土石流

Photo 3.2 Debris flows (2006, Inje)



写真－3.3　大韓民国・ピョンチャン市の土砂災害

Photo 3.3 Debris flows (2006, Pyeongchang)



写真－3.4　大韓民国・ソウル市における同時多発的ながけ崩れと土石流

Photo 3.4 Simultaneous shallow landslides and debris flow (2011, Seoul)

3.2.4　データ分析

土砂移動マグニチュード及び被害レベルの算出のために必要なデータを文献調査から得た。文献調査からデータが得られない場合には，航空写真，地すべり地形分布図の GIS データ，衛星写真，航空レーザ測量データ，DEM から必要なデータを抽出した。詳細なデータの取得方法は表－3.2 のとおりである。

表－3.2　土砂移動マグニチュードと被害レベルの算出に必要な変数の抽出方法

Table 3.2 Detailed methods for selecting parameters

Index	Parameter	Detailed methods for selecting parameters
SMM	Volume of moved sediment	- Obtain the values used in the literature - Estimate by interpreting aerial photographs to make GIS polygon data of the collapse area and multiply the area by the average depth of collapse - Calculate the volume by measuring the difference in elevation between two LIDAR data taken before and after the disaster
	Relative height of sediment movement	- Obtain the values used in the literature - Measure the relative height according to the definition of sediment movement magnitude regarding pictures of the collapse and moved sediment by reading elevations from contour maps - Estimate by interpreting aerial photos and reading elevations from contour maps - Measure the relative height by using GIS polygon data of the collapse - Measure the relative height by measuring the difference in elevation between two LIDAR data taken before and after the disaster - In case of multiple disasters, use the average relative height of collapse in that disaster
DL	Number of persons killed or missing Number of persons injured Number of houses totally collapsed Number of houses partially collapsed	All parameters were obtained from the literature.

3.3　結果と考察

3.3.1　土砂移動マグニチュード及び被害レベルの算出

土砂移動マグニチュード及び被害レベルの詳細な算出例として，日本における紀伊半島大水害，大韓民国におけるソウル市，ピョンチャン市，インジェ市での土砂災害の事例を表－3.3 に示す。また，本研究で調査を実施した土砂災害について，横軸に土砂移動マグニチュード，縦軸に被害レベルをとりプロットした図を図－3.2 に示す。

表－3.3　日本と韓国の事例における土砂移動マグニチュードと被害レベルの算出結果

Table 3.3 Calculation of SMM and DL for sediment disasters in Japan and Korea

Place	V (m^3)	H (m)	SMM	x_1	x_2	x_3	x_4	DL
Japan								
Typhoon Talas (2011)								
Kuridaira landslide dam	13,900,000	362	9.70	0	0	0	0	0.55
Akadani landslide dam	9,000,000	487	9.64	0	0	0	0	0.55
Nagatono landslide dam	6,800,000	414	9.45	0	0	0	0	0.55
Iya landslide dam	4,100,000	223	8.96	3	0	1	0	1.40
Kitamata landslide dam	1,200,000	164	8.29	0	0	2	2	0.78
All disasters in the Kii Peninshula	100,000,000	-	10.46*	62	0	99	91	2.64
Korea								
Seoul (2011)								
Kia Motors Yangjae Branch Office	111	58	3.81	0	0	0	0	0.55
Dwitgoal village	371	174	4.81	0	0	0	0	0.55
Raemian Apt.	410	194	4.90	5	10	0	1	1.71
Bodeok Temple	116	176	4.31	2	5	0	1	1.39
Songdong village	885	239	5.33	1	0	0	0	0.91
Shindonga Apt.	309	205	4.80	0	1	0	2	0.74
Seoul Arts Center	68	100	3.83	0	0	0	0	0.55
Whitsungji village	183	75	4.14	1	0	0	0	0.91
Yangjae Driving School	21	72	3.18	0	0	0	1	0.63
Jeonwon village	246	120	4.47	5	6	0	0	1.68
Hyeongchon village	1,442	199	5.46	1	3	0	0	1.15
EBS broadcasting	185	83	4.19	0	0	0	0	0.55
All disasters in Seoul	4,347	1,695	6.87	15	25	0	5	2.11
Pyeongchang (2006)								
Hajinbu-ri	719	172	5.09	2	1	1	3	1.35
Inje (2006)								
Deoksan-ri	115	199	4.36	5	0	1	2	1.59

*** Calculated by the values of the above 5 landslide dams, 5 biggest debris flows, deep-seated landslides and slope failures**

V : volume of moved sediment (m^3)

H : relative height (m)

SMM : sediment movement magnitude

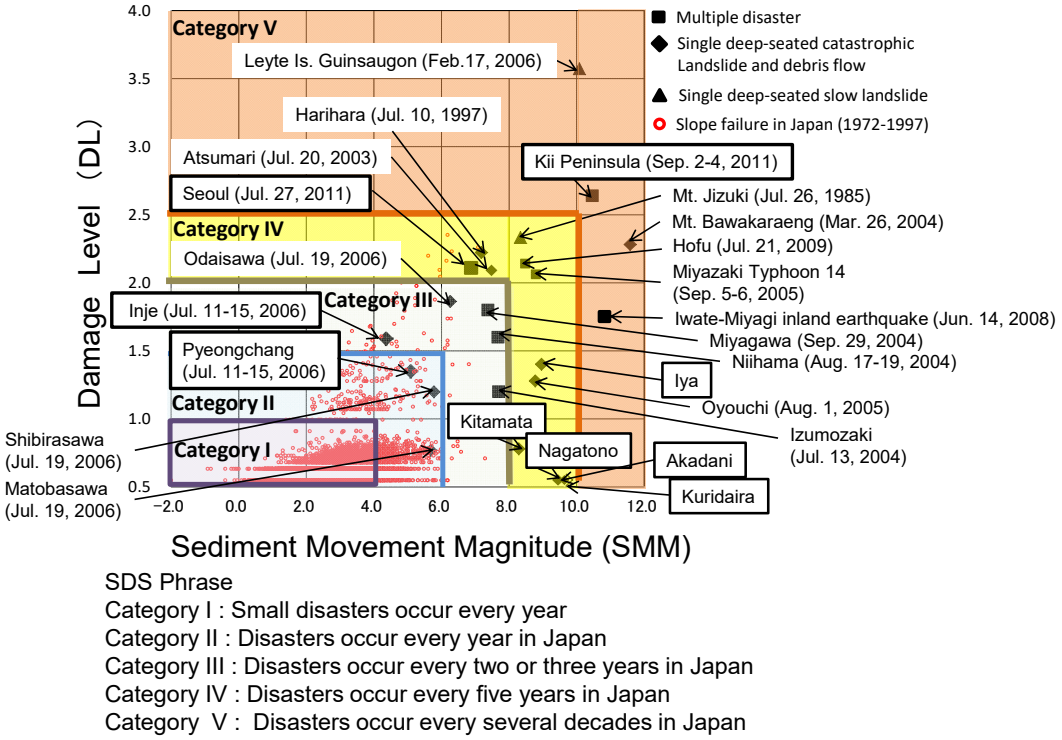
x_1 : number of persons killed or missing

x_2 : number of person injured

x_3 : number of houses totally collapsed

x_4 : number of partially collapsed

DL : damage level



図－3.2　過去の主要な土砂災害の土砂移動マグニチュードと被害レベルのプロット，及び，土砂災害スケールのカテゴリー区分

Fig. 3.2 Plotting of SMM and DL of past disasters and categories of SDS

図－3.2 のプロットの結果では，がけ崩れ，土石流，地すべり等の土砂移動形態の違いによる，プロット間に特定の偏りは見られない。土砂移動の個数についても，単一の崩壊による災害か多発した崩壊による災害かによる，プロット間に特定の偏りは見られない。さらに，自然環境や社会環境の異なる日本・韓国・他のアジアの国といった異なる国の災害においても，プロット間に特定の偏りは見られない。上記により，土砂移動マグニチュードと被害レベルを組み合わせる手法は，様々な土砂移動形態及び発生している範囲の土砂災害を 1 つのプロットとして表現できることを示している。これにより，課題 a 及び b を解決したものと考えられる。

また，課題 c の解決の観点から，図－3.2 を見た場合，土砂移動マグニチュードと被害レベルの間には，特定の偏りは見られない。例えば，都市域で発生したソウル市の災害では，土砂移動マグニチュードの値は小さいものの，被害レベルの値は大きい。一方で，人口密度が低い地域で発生した，紀伊半島大水害における熊野，北股，長殿，赤谷，栗平の深層崩壊による災害では，土砂移動マグニチュードは大きいものの，被害レベルは小さい。このことから，土砂移動マグニチュードと被害レベルを組み合わせる手法は，課題 c を解決しているものと考えられる。

上記より，土砂移動の規模を示す指標として「土砂移動マグニチュード」を横軸に，人的・物的被害を示す指標として「被害レベル」を縦軸に組み合わせる手法は，土砂移動現象の形態・対象とする範囲に依らず土砂災害の規模を評価可能であること，土砂移動の発生位置に偏らずに評価が行えることが示され，手法の妥当性が確認された。

3.3.2　土砂災害スケールの提案

3.3.1 に示したとおり，土砂移動マグニチュードと被害レベルの組み合わせにより，土砂災害規模の評価が可能である。しかしながら，例えば、住民に避難を促す場合，土砂災害の被害の深刻さを国内外に分かりやすく説明する場合等のために，より簡素な指標が望ましいと考えられる。

より簡素な指標として，図－3.2 において，土砂移動マグニチュードと被害レベルに基づき，災害の規模を５段階によって表現する「土砂災害スケール」を提案する。土砂移動スケールの各カテゴリーは以下のとおり定義される。

Category I：SMM < 4.0 and DL < 1.0

Category II：4.0 ≤ SMM < 6.0　or　1.0 ≤ DL < 1.5

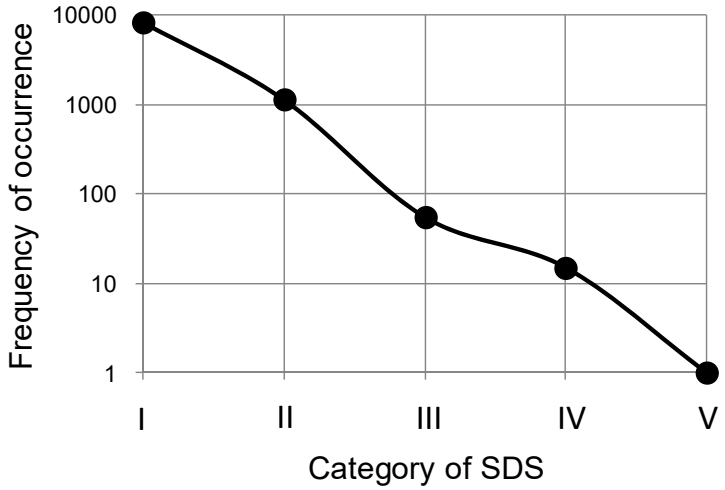
Category III：6.0 ≤ SMM < 8.0　or　1.5 ≤ DL < 2.0

Category IV：8.0 ≤ SMM < 10.0　or　2.0 ≤ DL < 2.5

Category V：10.0 < SMM　or　2.5 < DL

（ただし，上位カテゴリーと重複する部分は除く。）

再帰確率のように災害の規模と発生頻度に関する情報は，洪水，地震，火山噴火等，多くの自然災害で使われている。災害の規模と発生頻度の関係は，自然災害の危機管理において重要な情報である（例えば，Lateltin *et al.*, 2005）。本研究で提案する土砂災害スケールの各カテゴリーと図－3.2 に示した日本における土砂災害の発生頻度について比較を行い，結果を図－3.3 に示す。日本においては，土砂災害の規模の指標である土砂災害スケールのカテゴリーが 1 カテゴリー減少することにより，土砂災害の発生頻度が 10 倍程度となる。上記から本研究で提案する土砂災害スケール基づく手法は，土砂災害の発生頻度とも関連づいた指標として評価できる。



図－3.3　土砂災害スケールのカテゴリー別発生頻度

Fig. 3.3 Frequency of occurrence of disasters in categories of SDS

また，図－3.3 に基づいて日本における土砂災害の発生頻度について，土砂災害スケールの各カテゴリーの標語を以下のとおり作成した。

Category I：毎年発生する小規模な土砂災害
Category II：国内で毎年発生する規模の土砂災害
Category III：国内で 2～3 年に 1 度程度発生する規模の土砂災害
Category IV：国内で 5 年に 1 度程度発生する規模の土砂災害
Category V：国内で数 10 年に 1 度程度発生する規模の土砂災害

表－3.4 に土砂災害スケールの各カテゴリーと標語，及び，各カテゴリーにおいて発生した土砂災害の具体事例から，土砂災害の規模と社会的・経済的影響の関係について分析する。表－3.4 において，土砂災害スケールの各カテゴリーが，社会的・経済的影響の事例として，災害の復旧・復興のための対策工事の規模と関連があることが分かる。例えば，カテゴリーⅢにおける，小田井沢の災害事例では，県による災害対策工事が行われている。一方で，カテゴリーⅣにおける防府市の災害事例，及び，カテゴリーⅤにおける紀伊半島大水害の災害事例では，国（国土交通省）による直轄による対策工事が行われている。

次に，具体事例は多くないものの，土砂災害発災後の新聞記事の掲載期間を調べ，表－3.4 に示し，社会的・経済的影響の事例として，土砂災害の規模と新聞・テレビ放送等のマスメディアにおける土砂災害に関するニュースの残存期間の関係を見ると，以下のような土砂災害スケールの各カテゴリーの標語を作成できる可能性がある。

Category I：地域のニュースとして報道される可能性がある災害
Category II：国内全域で 1 日程度ニュースとして報道される可能性がある災害
Category III：国内全域で 2～3 日程度ニュースとして報道される可能性がある災害
Category IV：国内全域で 1 週間程度ニュースとして報道される可能性がある災害
Category V：国内全域で 1 ヶ月程度ニュースとして報道される可能性がある災害

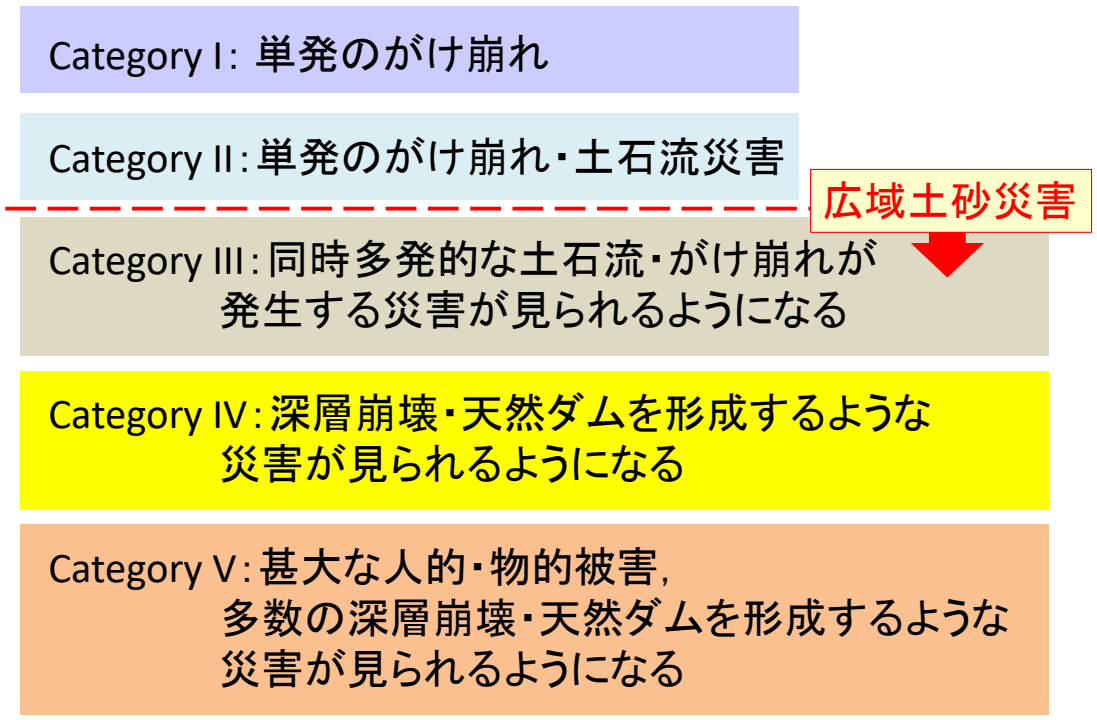
広域土砂災害の初動時被害状況として，土砂災害スケールの算出に用いる，土砂移動に関する情報として「流出土砂量」「比高」，人的・物的被害に関する情報として「死者・行方不明者数」「全壊家屋数」「半壊家屋数」「一部損壊家屋数」は，災害後の初期に得られる情報と考えられる。土砂災害スケールに基づく土砂災害の規模の評価と各カテゴリーの標語を用いることによって，土砂災害の規模を定量的に指標化し，調査結果から最大被害を推定することが可能になると考えられる。

表－3.4　土砂災害スケールのカテゴリー及びフレーズと代表的な災害における関連事実と復旧への活動の事例

Table 3.4 SDS Categories and phrase and relationship between SDS and example of related facts and activities for recovery

SDS Category	SMM	DL	Relative Frequency (SDS category V = aprox. 1)	SDS Phrase	Example of related facts and activities for recovery
I	SMM < 4.0	DL < 1.0	10000	Small disasters happen every year	Prefectural or municipal government implemented rehabilitation plan.
II	4.0 ≦ SMM < 6.0	1.0 ≦ DL < 1.5	1000	Disasters occur every year in Japan	Shibirasawa - Single debris flow - Prefectural government implemented rehabilitation plan (Budget about 600 million yen).
III	6.0 ≦ SMM < 8.0	1.5 ≦ DL < 2.0	100	Disasters occur every two or three years in Japan	Odaisawa - Single debris flow - Prefectural government implemented rehabilitation plan (Budget 2,200 million yen). Harihara - Single deep-seated catastrophic landslide - Prefectural government implemented rehabilitation plan. (Budget 3,600 million yen)
IV	8.0 ≦ SMM < 10.0	2.0 ≦ DL < 2.5	10	Disasters occur every five years in Japan	Hofu - Multiple debris flows and shallow landslides - Total moved sediment volume 2.35 million m^3. - Japanese government (MLIT) directly implemented emergency rehabilitation plan. - Covered by major Japanese newspapers for about one week
V	10.0 < SMM	2.5 < DL	1	Disasters occur every several decades in Japan	Kii Peninsula - Most severe sediment disaster caused by torrential rainfall since World War II in Japan - 72 deep-seated catastrophic landslide and multiple sediment disasters - Total moved sediment volume 100 million m^3. - Japanese government (MLIT) directly implemented emergency rehabilitation plan. - Covered by major Japanese newspapers for about one month

また，図－3.2 の土砂災害スケールの区分毎の土砂災害の特徴に着目すると，図－3.4 のようにカテゴリーⅢ以上に分類される災害が広域土砂災害に特徴的な土砂移動形態を有しており，定量的に広域土砂災害を区分可能な手法を提案することができたと考えられた。



図－3.4　土砂災害スケールごとの土砂災害の特徴

Fig. 3.4 Characteristic of sediment disaster in each SDS

3.4　まとめ

本章では，広域土砂災害の初動時被害状況から土砂災害の規模を定量的に評価し，最大被害を推定する指標の作成について検討を行った。土砂移動の規模を示す指標として「土砂移動マグニチュード」を横軸に，人的・物的被害を示す指標として「被害レベル」を縦軸に組み合わせ，両指標の組み合わせを 5 段階のカテゴリー（Ⅰ～Ⅴ）に区分して土砂災害の規模を評価する手法「土砂災害スケール」を提案した。過去の日本・アジア地域での災害事例について，本研究で提案する手法の妥当性を確認したところ，評価結果に特定の偏りが見られず，土砂移動現象の形態・対象とする範囲に依らず土砂災害の規模を評価可能であること，土砂移動の発生位置に偏らずに評価が行えることが示され，手法の妥当性が確認された。また，土砂災害スケールの区分毎の土砂災害の特徴に着目することにより，カテゴリーⅢ以上に分類される災害が広域土砂災害に特徴的な土砂移動形態を有していることを明らかにし，定量的に広域土砂災害

を区分可能な手法を提案することができた。

第 4 章　人工衛星 SAR を用いた崩壊地抽出に関する研究

4.1　はじめに

1.3 において，広域土砂災害の初動時の被害状況調査技術のうち，人工衛星により撮影された SAR 画像（以下，SAR 画像）を用いた調査は，調査面積が広域であり，かつ，悪天候時・夜間でも調査が可能な観点から，河道閉塞や土石流等の発生実態調査の時間短縮及び精度向上において有利な技術であることが明らかとなった。加えて，SAR 画像の判読・解析について，現状，概略的な調査技術として用いられているものの，より客観性・再現性高く崩壊地の分布を把握するような手法の検討によって，河道閉塞や土石流の発生実態調査の時間短縮及び精度向上に繋がることが示された。そこで，本章では，SAR 画像を用いた崩壊地抽出手法について検討を実施した。第 5 章においては，SAR 画像を用いた河道閉塞箇所判読手法に関する研究について述べる。

4.2　人工衛星により撮影された SAR 画像の特徴

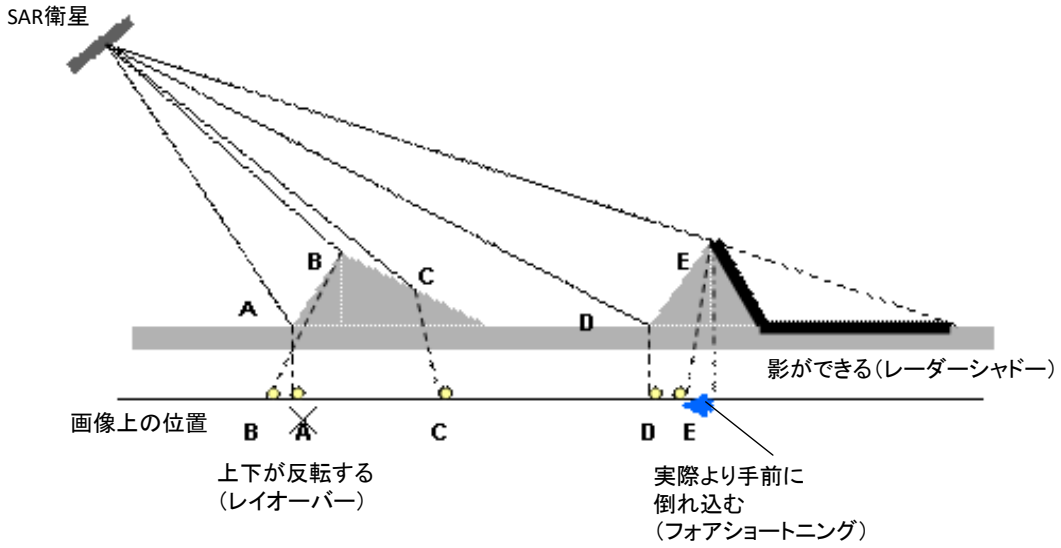
1.3.2 で述べたように，SAR 画像は，人工衛星に搭載された合成開口レーダーから地上に向け，斜めに照射されたマイクロ波の後方散乱波の強度を画像として記録することにより，SAR 画像は取得される。SAR 画像はその撮影方法からモノクロの鳥瞰図のような画像が取得される。そのため，本項では，SAR 画像の判読・解析に関する検討を行うための SAR 画像の観測原理，特徴について述べる。

4.2.1　SAR 画像の観測原理

人工衛星に搭載されている観測センサは，大きく分けて，可視域から近赤外域等を観測する光学センサと合成開口レーダーの 2 つに分類できる。合成開口レーダーは，電磁波（電波）のマイクロ波を送信し，反射波を観測するもので，航空機観測が難しい夜間や悪天候時を含め，昼夜を問わず地表面の状況を観測することが可能である。

人工衛星からの SAR 画像の撮像は，衛星からマイクロ波を地上に向けて斜めにアンテナから照射し，地上からのエコーをアンテナからの距離に応じて記録するものである。撮像は，マイクロ波を照射するため，太陽光を必要としない

ことから，夜間においても観測可能であり，また，衛星で利用されるマイクロ波（X バンド 25～37.5mm，C バンド 37.5～75mm，L バンド 150mm～300mm）は，大気中の水蒸気，雨滴等に吸収されにくく，悪天候時においても地表の状態の観測が可能である（日本リモートセンシング学会，2011；水野ら，2013）。また，SAR は，マイクロ波が地上に対して斜めに照射されるため，図－4.1 に示すように，①急斜面等の上部が下部よりアンテナに近くなり画像が白くつぶれるレイオーバー（図－4.1 の A，B），高い山等が実際の平面位置よりアンテナに近い位置に記録されるフォアショートニング（図－4.1 の E），マイクロ波が高い山等に遮られ影ができる（レーダーシャドー）等，SAR 画像に特徴的な現象が画像に現れる。また，SAR 画像上において，水面はマイクロ波の鏡面反射により，衛星においてエコーが受信されないため黒く写る。マイクロ波の当たらない崩壊地の滑落崖は小さなレーダーシャドーとして黒く写る。



図－4.1　SAR 画像に特徴的な現象（林ら（2013）の図を一部修正）

Fig. 4.1　Characteristic phenomena on SAR artificial satellite imagery (After Hayashi *et al.*, 2013)

4.2.2　SAR の活用事例

土砂災害における被害状況調査のみならず，SAR は津波・河川洪水氾濫等の災害調査に活用されている。また，SAR は表－4.1 に示すように，多岐にわたる

分野において応用されている。

表－4.1　SAR の応用分野（日本リモートセンシング学会，2011 から抜粋）

Table 4.1 Applications of SAR (After The remote sensing society of Japan, 2011)

応用分野	代表的な観測対象と応用例
地学	地形図・DEM・DSM作成　地殻変動計測　地質構造　断層抽出　地下資源探査
農学	農作物分類　作付け面積計測　生育状態・災害把握　土壌水分量計測
森林	バイオマス計測　樹種分類　植林・伐採・火災面積計測　樹高計測　生育状態・災害把握
都市	密度・構造・空間分布・線路・道路・橋等の分類　地盤沈下計測　交通量計測
水文	河川・湖等の面積計測　河川流速計測　湿原・水系パターン抽出　土壌水分量計測
海洋	波浪　内部波　海流　海上風　潮目　海底構造　油汚染　海底油田調査　漂流物・船舶検出及び識別
海氷	海氷の分類　氷年齢・変動　氷山探査と追尾　船舶の氷海航行
雪氷	氷河・氷床の分類　消耗・涵養　流速・変動　積雪・氷河・氷床相当水量計測
災害	予測　ライフライン探査　被害・復興状況把握　波浪・津波・高波等の計測
考古学	地上・地下遺跡踏査及び探査　管理
軍事	一般偵察　車両等の探査・変化抽出　活動跡検出　船舶・潜水艇検出　被害把握

4.3　崩壊地抽出手法

合成開口レーダーを用いた土砂災害観測や地殻変動調査，地盤沈下調査等については，これまでに様々な研究が行われている。代表的な解析手法としては，①地殻変動や地表変位などを把握する InSAR 解析（矢来ら，2002 ; 葛岡・水野，2004），②地表面の被覆状況によって後方散乱係数（強度画像）の特性が異なることを利用した差分や統計量，相関を用いた崩壊地分類（林ら，2000 ; Matsuoka and Yamazaki, 2004 ; CAO *et al.*, 2008），③加色混合法による地殻変動把握（飛田ら，2006），④マッチング手法による地殻変動，地すべり把握（飛田ら，2001），⑤三成分散乱モデル分解による土石流流出範囲，地表面状況，崩壊地把握（渡辺ら，2007），⑥四成分散乱モデル分解による地表面状況把握（和田ら，2007）などが挙げられる。これらの解析手法のうち，広域土砂災害発生時の迅速な被害状況の把握に資するため，広域において比較的短時間で崩壊地の抽出が可能な即時性を有する手法は，②の後方散乱係数（強度画像）の差分や統計量，相関を用いた崩壊地分類手法であり，主な手法として，相関係数差分解析（Matsuoka and Yamazaki, 2004），NDPI 差分解析（CAO *et al.*, 2008）がある。

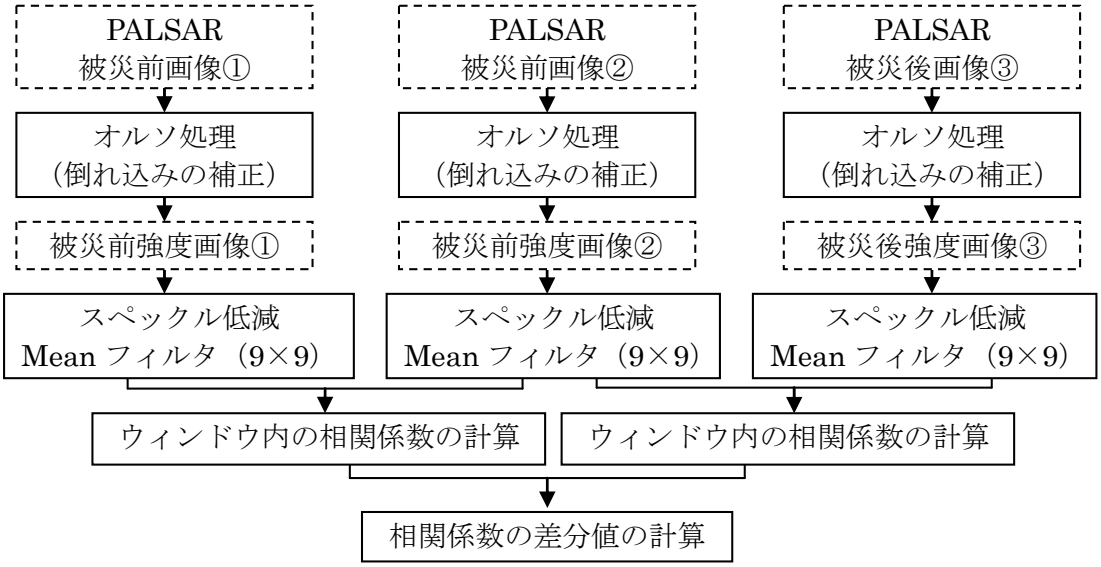
本章では，陸域観測衛星 ALOS（だいち）に搭載された合成開口レーダーであ

る PALSAR データを用いて，①相関係数差分解析，②NDPI 差分解析により崩壊地を抽出した（林ら，2012b）。具体的には，陸域観測衛星 ALOS（だいち）の合成開口レーダーを用いて，①平成 20 年 6 月 14 日岩手宮城内陸地震で土砂災害が多発した地域，②平成 21 年 7 月 21 日の豪雨により発生した山口県防府市周辺での土砂災害発生地域という，災害の発生形態，地域の条件等の異なるそれぞれの地域で崩壊地を抽出した。なお，ここでの崩壊地については，土石流による土砂移動域についても崩壊地として取り扱っている。また，甚大な被害を引き起こすと考えられる面積 10,000m^2 以上の崩壊地（土木研究所，2012）を抽出可能であるかについても評価を行った。

4.3.1　相関係数差分解析

相関係数差分解析は，災害前の 2 時期と災害前後のそれぞれの強度画像の相関係数を算出し，その差分値から，地すべりや崩壊によって植生が裸地に変化する等，地表の被覆物の変化を捉えるものである。その変化を見ることで，地すべり・斜面崩壊箇所との対応が確認される。

PALSAR データの相関係数差分解析による崩壊地の抽出フローを図－4.2 に示す。

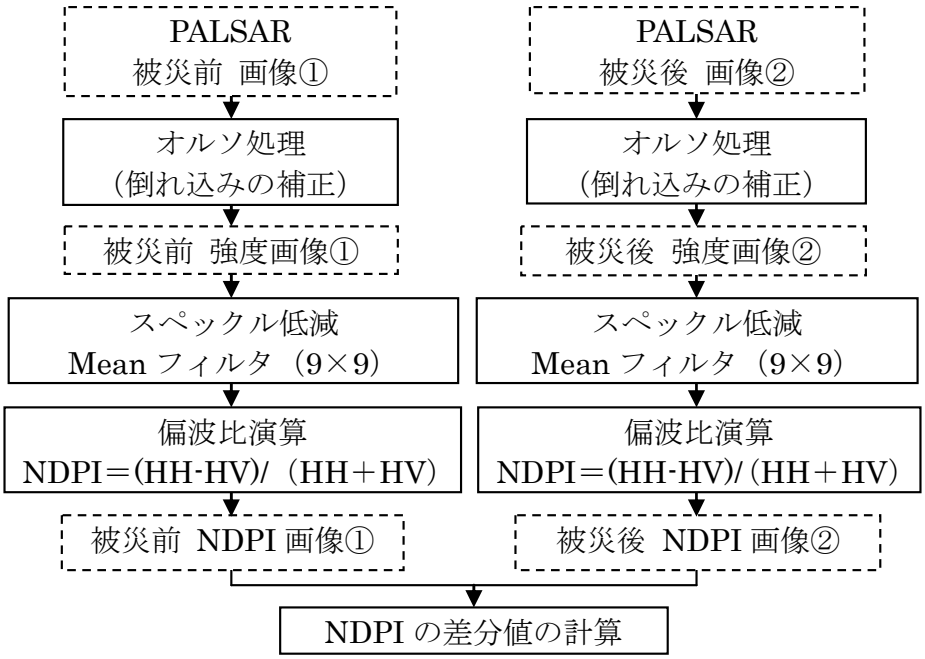


図－4.2　相関係数差分解析による崩壊地抽出フロー

Fig. 4.2 Detecting landslides by the correlation coefficient difference analysis procedure

4.3.2　NDPI 差分解析

NDPI　（Normalized Difference Polarization Index）差分解析は，偏波解析の一手法であり，解析の指標として NDPI=（HH-HV）/（HH+HV）を用いる。これは，HH（送受信が水平偏波）と HV（送信が水平偏波，受信が垂直偏波）の強度の比演算で算出される値であり，地すべりや斜面崩壊によって植生が裸地に変化する等，地表の被覆物が大きく変化した場所で，差分値（絶対値）が大きな値を取り，それにより，地すべり・斜面崩壊箇所との対応が確認される。PALSAR データの NDPI 差分解析による崩壊地の抽出フローを図－4.3 に示す。



図－4.3 NDPI 差分解析による崩壊地抽出フロー

Fig. 4.3 Detecting landslides by the NDPI difference analysis procedure

4.4 既往災害のへの適用

4.4.1 平成 20 年 6 月 14 日岩手宮城内陸地震

平成 20 年 6 月 14 日岩手宮城内陸地震（以下，岩手宮城内陸地震）で土砂災害が多発した迫川上流の湯ノ倉温泉周辺を含む地域を対象に，地震後の新規崩壊地を抽出した。

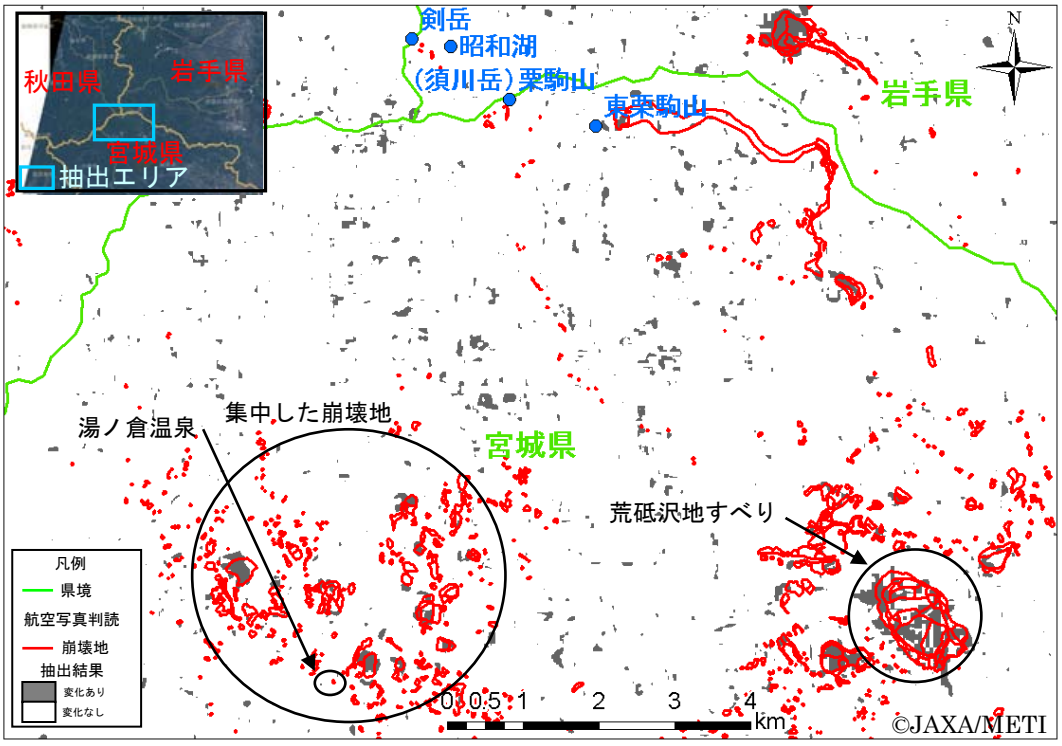
精度良い崩壊地の抽出のためには可能な限り地震の直前，直後の衛星画像の組み合わせであることが望ましいことから，使用した衛星画像の選定の考え方は次のとおりとした。相関係数差分解析は，偏波モード，オフナディア角，軌道向きのそれぞれが同一である地震前 2 シーン，地震後 1 シーンを選定した。NDPI 差分解析は，HH と HV の偏波モードであり，かつ，オフナディア角，軌道向きのそれぞれが同一である地震前 1 シーン，地震後 1 シーンを選定した。

1） 相関係数差分解析

「相関係数差分解析による抽出結果」と，崩壊地位置の正解とする「災害後

の航空写真から判読した崩壊地の GIS データ」を重ねた図を，図－4.4 に示す。

崩壊地抽出結果を，図－4.4 に灰色で示している。崩壊地として抽出した灰色のメッシュは，全メッシュの相関係数の差分値の平均値の－2σを目安に設定したしきい値を越えるメッシュである。また，航空写真判読から得られた崩壊地位置を，図－4.4 に赤細線で示す。図－4.4 中で，左下の迫川上流の湯ノ倉温泉周辺の集中した崩壊地，右下の荒砥沢地すべりの大規模崩壊地は，定性的ではあるが灰色に浮き出ており，大規模な崩壊が集中して発生した箇所は概ね把握できている。



図－4. 4　岩手宮城内陸地震の相関係数差分解析

（観測日:2007/8/29・2008/5/31・2008/7/16，使用データは MEAN フィルタ後のデータ，10m 解像度，画像はすべて FBS，HH，オフナディア角 34.3°，ディセンディング，処理レベル 1.0）

Fig. 4.4 Result of landslide detection by the correlation coefficient difference analysis in the area affected by the Iwate-Miyagi inland earthquake

実際の崩壊地が解析による抽出結果により捉えられているかという観点から，災害後の航空写真から判読した崩壊地位置を正解とし，崩壊地位置のポリゴンと想定される崩壊地が 1 メッシュでも重なるものを認識できたとして，航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率を表－4.2 に示す。また，過抽出の影響を評価するため，解析による抽出結果が実際の崩壊地を捉えているかという観点から，想定される崩壊地（候補崩壊）が 1 メッシュでも崩壊地位置のポリゴンと重なるものを認識したとして，SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率を表－4.3 に示す。

表－4.2 においては，20×20 メッシュ相当以上の崩壊地規模では，航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率は 100%である。10×10 メッシュ相当以上の崩壊地規模では，航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率は 60.2%である。一方，3×3 メッシュ相当未満の崩壊地規模では実際の崩壊数の増加に比して，抽出数が増加しなくなる傾向がある。表－4.3 においては，20×20 メッシュ相当以上の崩壊地規模では，SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率は 100%, 10×10 メッシュ相当以上の崩壊地規模では，SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率は 39.8%である。5×5 メッシュ相当未満の崩壊地規模では SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率は 20%以下となる。

表－4.2　岩手宮城内陸地震の相関係数差分解析の航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率

Table 4.2 Recognition ratio of landslide detection based on landslides classified by interpretation of aerial photos by the correlation coefficient difference analysis in the area affected by the Iwate-Miyagi inland earthquake

崩壊地面積の規模（m^2） （相当するメッシュ数）	崩壊数	抽出数	航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率= 抽出数/崩壊数
＞0 （すべての崩壊地）	1,967	175	8.9%
≧100 （1×1 相当以上）	1,956	175	9.0%
≧400 （2×2 相当以上）	1,395	162	11.6%
≧900 （3×3 相当以上）	769	141	18.3%
≧2,500 （5×5 相当以上）	314	104	33.1%
≧10,000 （10×10 相当以上）	88	53	60.2%
≧40,000 （20×20 相当以上）	13	13	100.0%

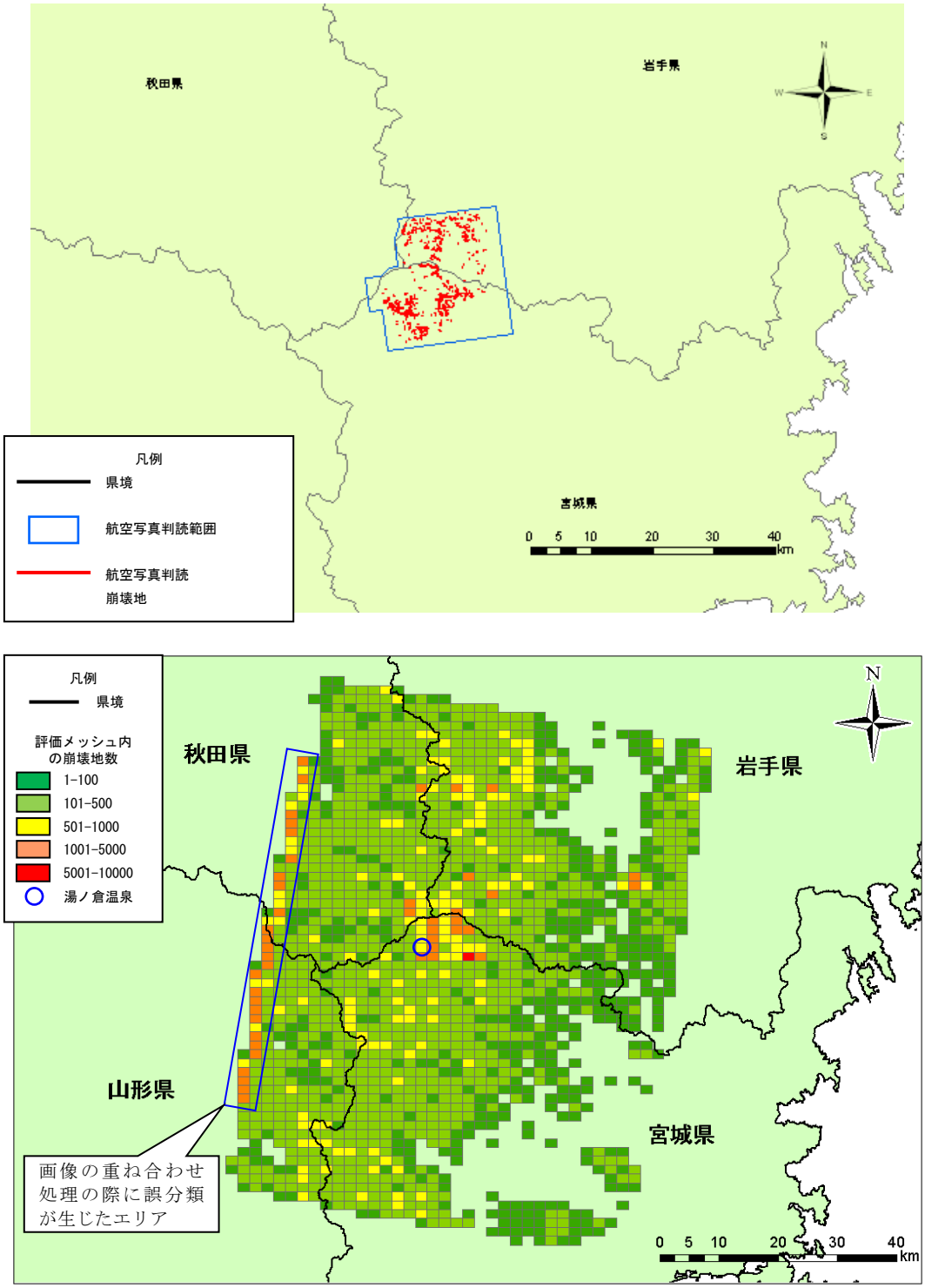
表－4.3　岩手宮城内陸地震の相関係数差分解析の SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率

Table 4.3 Recognition ratio of landslide detection based on analysis of SAR imagery by the correlation coefficient difference analysis in the area affected by the Iwate-Miyagi inland earthquake

崩壊地面積の規模（m^2） （相当するメッシュ数）	候補 崩壊数	抽出数	SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率= 抽出数/候補崩壊数
＞0 （すべての崩壊地）	2,286	176	7.7%
≧100 （1×1 相当以上）	2,035	170	8.4%
≧400 （2×2 相当以上）	1,519	156	10.3%
≧900 （3×3 相当以上）	1,181	146	12.4%
≧2,500 （5×5 相当以上）	610	109	17.9%
≧10,000 （10×10 相当以上）	113	45	39.8%
≧40,000 （20×20 相当以上）	12	12	100.0%

図－4.4，表－4.2，4.3 では，災害後の航空写真判読のある範囲の航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率・SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率を整理したが，さらに，広域から災害の状況を捉えられているかをみるために，国土基本図 1/2,500 地形図の図郭 1.5km×2km メッシュを評価単位とした崩壊地のメッシュ集計を行った。なお，災害後の航空写真判読の範囲外においては，国土交通省等が地震後に実施した，土砂災害危険箇所等の緊急点検の結果（国土交通省砂防部，2008b）等から，崩壊の多発が見られない事を確認している。相関係数差分解析のメッシュ集計を，図－4.5 に示す。図－4.5 の下図の評価メッシュの分布域において，北東部や南東部に分布する色づけされていない地域は，国土地理院発行の数値地図 50m メッシュ標高を利用して，斜面勾配 10 度以下の市街地や畑地・水田等を評価対象外とした地域である。

広域でみると，解析により，迫川上流の湯ノ倉温泉周辺の崩壊地は抽出されているものの，崩壊が集中した航空写真判読範囲と比較すると，範囲外において，実際の崩壊地以外の箇所が崩壊候補として抽出されていることが分かった。精度向上のためには，画像の西側輪郭部の重ね合わせ処理の際に生じた誤分類は，後処理もしくは最初からマスキング処理をする必要がある。



図－4.5　岩手宮城内陸地震の相関係数差分解析のメッシュ集計

（観測日:2007/8/29・2008/5/31・2008/7/16）

Fig. 4.5 Counting mesh units in landslide detection by the correlation coefficient difference analysis in the area affected by the Iwate-Miyagi inland earthquake

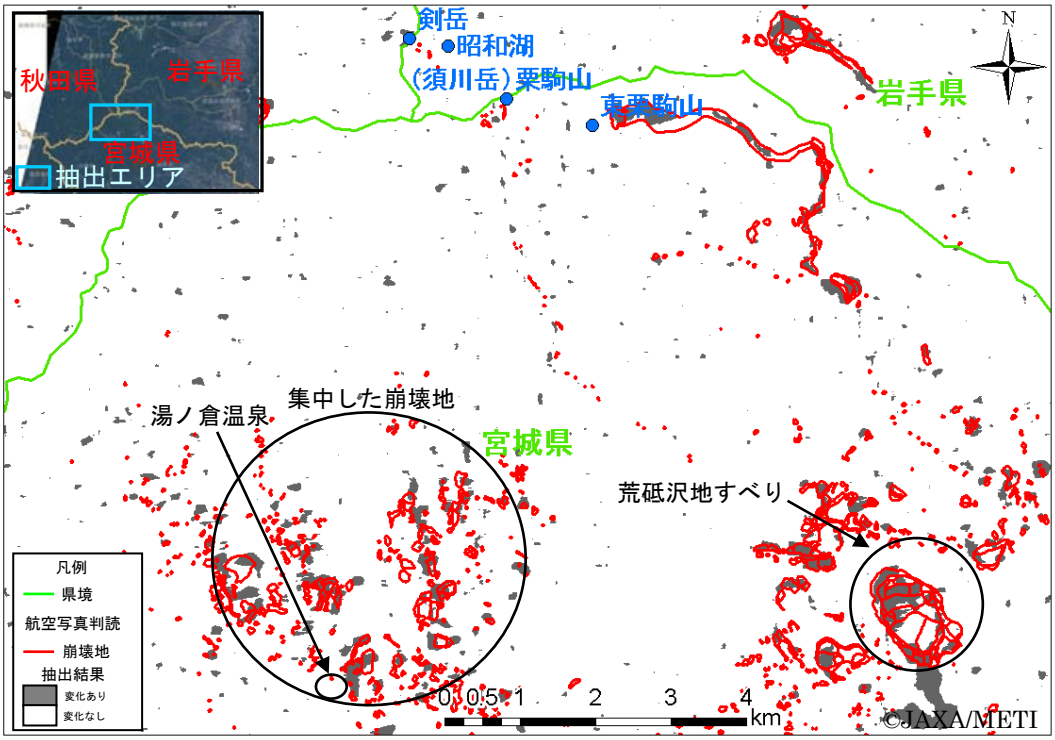
2) NDPI 差分解析

「NDPI 差分解析による抽出結果」と，崩壊地位置の正解とする「災害後の航空写真から判読した崩壊地の GIS データ」を重ねた図を，図－4.6 に示す。

崩壊地抽出結果を，図－4.6 に灰色で示している。崩壊地として抽出した灰色のメッシュは，全メッシュの NDPI 値の差分値の平均値の＋2σを目安に設定したしきい値を越えるメッシュである。

図－4.6 中で，相関係数差分解析結果と同じく，大規模な崩壊が集中して発生した箇所は概ね把握できている。

相関係数差分解析の場合と同様に，航空写真判読結果から得られた崩壊地を正



図－4.6　岩手宮城内陸地震の NDPI 差分解析

（観測日:2007/6/21･2008/9/23，使用データは MEAN フィルタ後のデータ，12.5m 解像度，画像はすべて FBD, HH+HV, オフナディア角 34.3°，アセンディング, 処理レベル 1.5GR）

Fig. 4.6 Result of landslide detection by the NDPI difference analysis in the area affected by the Iwate-Miyagi inland earthquake

とした場合の認識率を表－4.4 に示す。また，SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率を表－4.5 に示す。

表－4.4 においては，20×20 メッシュ相当以上の崩壊地規模では，航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率は 100%である。10×10 メッシュ相当以上の崩壊地規模では，航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率は 89.7%である。一方，3×3 メッシュ相当未満の崩壊地規模では実際の崩壊数の増加に比して，抽出数が増加しなくなる傾向がある。表－4.5 においては，20×20 メッシュ相当以上の崩壊地規模では，SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率は 87.8%，10×10 メッシュ相当以上の崩壊地規模では，SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率は 44.3%である。5×5 メッシュ相当未満の崩壊地規模では SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率は 25%以下となる。

表－4.4 岩手宮城内陸地震の NDPI 差分解析の航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率

Table 4.4 Recognition ratio of landslide detection based on landslides classified by interpretation of aerial photos by NDPI difference analysis in the area affected by the Iwate-Miyagi inland earthquake

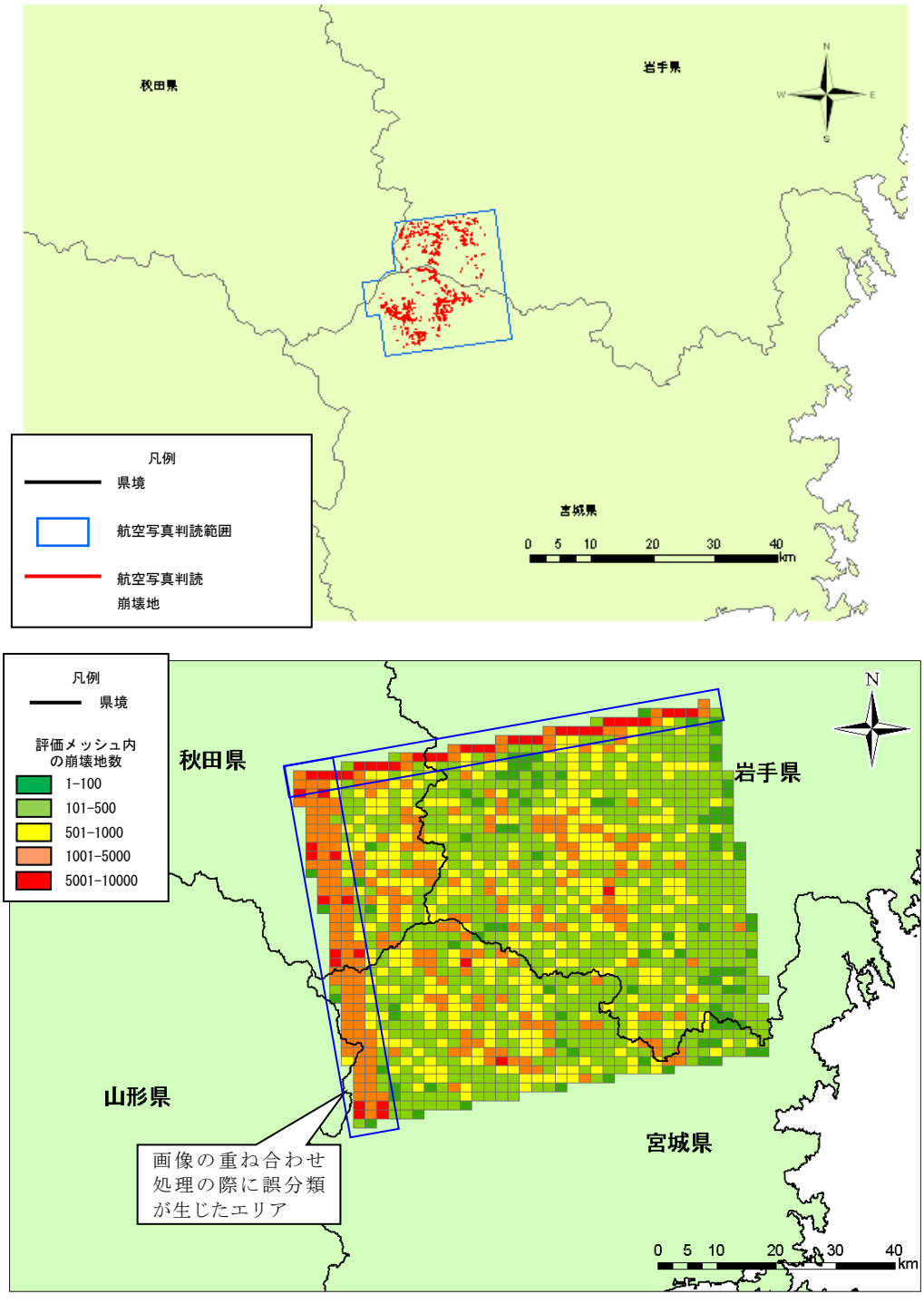
崩壊地面積の規模(m^2) （相当するメッシュ数）	崩壊数	抽出数	航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率= 抽出数/崩壊数
＞0 （すべての崩壊地）	1,967	376	19.1%
≧156.25 （1×1 相当以上）	1,898	375	19.8%
≧625 （2×2 相当以上）	1,027	313	30.5%
≧1,406.25 （3×3 相当以上）	539	238	44.2%
≧3,906.25 （5×5 相当以上）	214	137	64.0%
≧15,625 （10×10 相当以上）	39	35	89.7%
≧62,500 （20×20 相当以上）	9	9	100.0%

表－4.5 岩手宮城内陸地震の NDPI 差分解析の SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率

Table 4.5 Recognition ratio of landslide detection based on analysis of SAR imagery by NDPI difference analysis in the area affected by the Iwate-Miyagi inland earthquake

崩壊地面積の規模(m^2) （相当するメッシュ数）	候補 崩壊数	抽出数	SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率= 抽出数/候補崩壊数
＞0 （すべての崩壊地）	2,027	248	12.2%
≧156.25 （1×1 相当以上）	2,027	248	12.2%
≧625 （2×2 相当以上）	1,431	216	15.1%
≧1,406.25 （3×3 相当以上）	1,170	202	17.3%
≧3,906.25 （5×5 相当以上）	742	178	24.0%
≧15,625 （10×10 相当以上）	237	105	44.3%
≧62,500 （20×20 相当以上）	41	36	87.8%

さらに，相関係数差分解析と同様に崩壊地のメッシュ集計を行った結果を，図－4.7 に示す。広域でみると，相関係数差分解析よりも，崩壊地以外の箇所が崩壊候補として多く抽出されていることが分かった。NDPI 解析を実施する際には，崩壊地を過剰に抽出するケースが起こりえることに留意が必要である。また，精度向上のためには，画像の北側・西側輪郭部の重ね合わせ処理の際に生じた誤分類は，後処理もしくは最初からマスキング処理をする必要がある。



図－4.7　岩手宮城内陸地震の NDPI 差分解析のメッシュ集計

（観測日: 2007/6/21･2008/9/23）

Fig. 4.7 Counting mesh units in landslide detection by NDPI difference analysis in the area affected by the Iwate-Miyagi inland earthquake

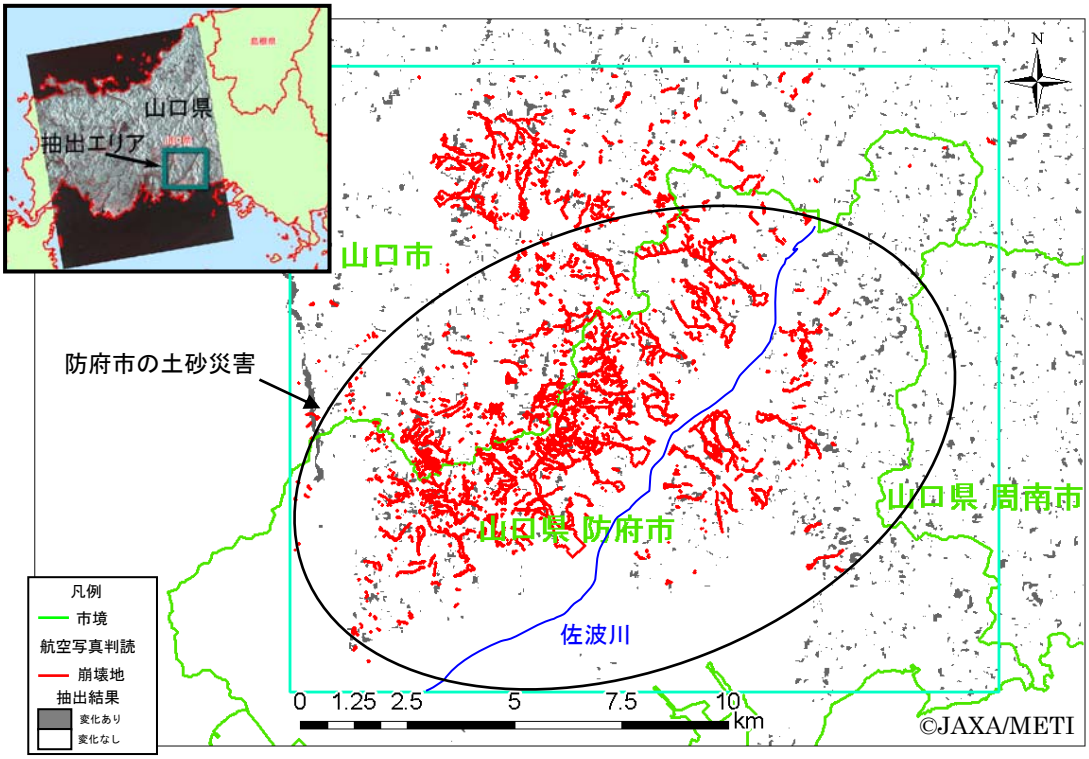
4.4.2　平成 21 年 7 月 21 日山口県防府市周辺での豪雨災害

平成 21 年 7 月 21 日豪雨により発生した山口県防府市周辺の土砂災害（以下，山口災害）の被害地域を対象に，豪雨後の崩壊地を抽出した。衛星画像の選定の考え方は，岩手宮城内陸地震と同じである。

1)　相関係数差分解析

「相関係数差分解析による抽出結果」と「災害後の航空写真から判読した崩壊地 GIS データ」を重ねた図を，図－4.8 に示す。

図－4.8 に示すように防府市の佐波川流域周辺で集中した崩壊地，土石流発生箇所について想定する崩壊地が灰色に浮き出ている。同時に，それ以外の部分でも灰色に浮き出ている部分が多くある。



図－4.8　山口災害の相関係数差分解析

（観測日: 2007/10/9・2009/7/14・2009/8/12，使用データは MEAN フィルタ後のデータ，10m 解像度，画像はすべて FBD，HV，オフナディア角 34.3°，アセンディング，処理レベル 1.0）

Fig. 4.8 Result of landslide detection by correlation coefficient difference analysis in the Yamaguchi disaster

また，航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率を表－4.6，SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率を表－4.7 に示す。（航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率・SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率の定義は岩手宮城内陸地震と同様）

表－4.6 においては，20×20 メッシュ相当以上の崩壊地規模では，航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率は 92.9%である。10×10 メッシュ相当以上の崩壊地規模では，航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率は 77.1%である。一方，5×5 メッシュ相当未満の崩壊地規模では実際の崩壊数の増加に比して，抽出数が増加しなくなる傾向がある。表－4.7 においては，20×20 メッシュ相当以上の崩壊地規模では，SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率は 41.7%，10×10 メッシュ相当以上の崩壊地規模では，SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率は 28.7%である。5×5 メッシュ相当未満の崩壊地規模では SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率は 20%以下となる。

表－4.6　山口災害の相関係数差分解析の航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率

Table 4.6 Recognition ratio of landslide detection based on landslides classified by interpretation of aerial photos by the correlation coefficient difference analysis in the area affected by the Yamaguchi disaster

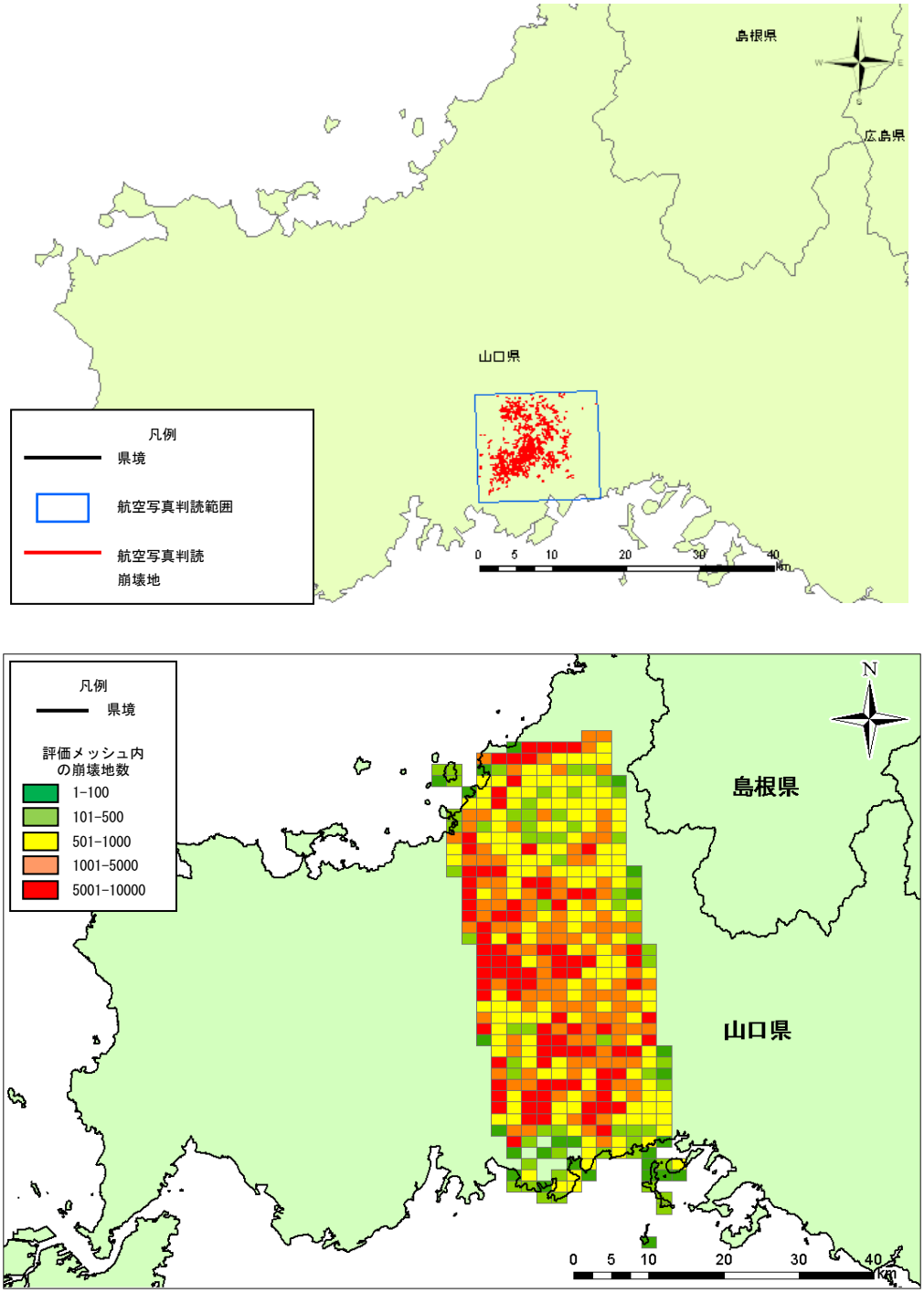
崩壊地面積の規模（m^2） （相当するメッシュ数）	崩壊数	抽出数	航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率= 抽出数/崩壊数
＞0 （すべての崩壊地）	723	178	24.6%
≧100 （1×1 相当以上）	705	178	25.3%
≧400 （2×2 相当以上）	617	168	27.2%
≧900 （3×3 相当以上）	450	147	32.7%
≧2,500 （5×5 相当以上）	244	121	49.6%
≧10,000 （10×10 相当以上）	96	74	77.1%
≧40,000 （20×20 相当以上）	28	26	92.9%

表－4.7　山口災害の相関係数差分解析の SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率

Table 4.7 Recognition ratio of landslide detection based on analysis of SAR imagery by the correlation coefficient difference analysis in the area affected by the Yamaguchi disaster

崩壊地面積の規模（m^2） （相当するメッシュ数）	候補 崩壊数	抽出数	SAR画像解析による抽出結果の崩壊地認識率= 抽出数/候補崩壊数
＞0 （すべての崩壊地）	2,235	233	10.4%
≧100 （1×1 相当以上）	2,055	227	11.1%
≧400 （2×2 相当以上）	1,688	211	12.5%
≧900 （3×3 相当以上）	1,383	192	13.9%
≧2,500 （5×5 相当以上）	855	152	17.8%
≧10,000 （10×10 相当以上）	216	62	28.7%
≧40,000 （20×20 相当以上）	12	5	41.7%

さらに，広域をみるために，岩手宮城内陸地震同様に崩壊地のメッシュ集計を行った結果を，図－4.9 に示す。なお，災害後の航空写真判読の範囲外においては，国土交通省等が地震後に実施した，土砂災害危険箇所等の緊急点検の結果（国土交通省中国地方整備局，2009）等から，崩壊の多発が見られない事を確認している。防府市の佐波川流域周辺で集中した崩壊地，土石流発生箇所は抽出しているものの，崩壊地以外が崩壊候補として抽出されていることが分かった。解析を実施する際には，過剰に抽出するケースが起こりえることに留意が必要である。



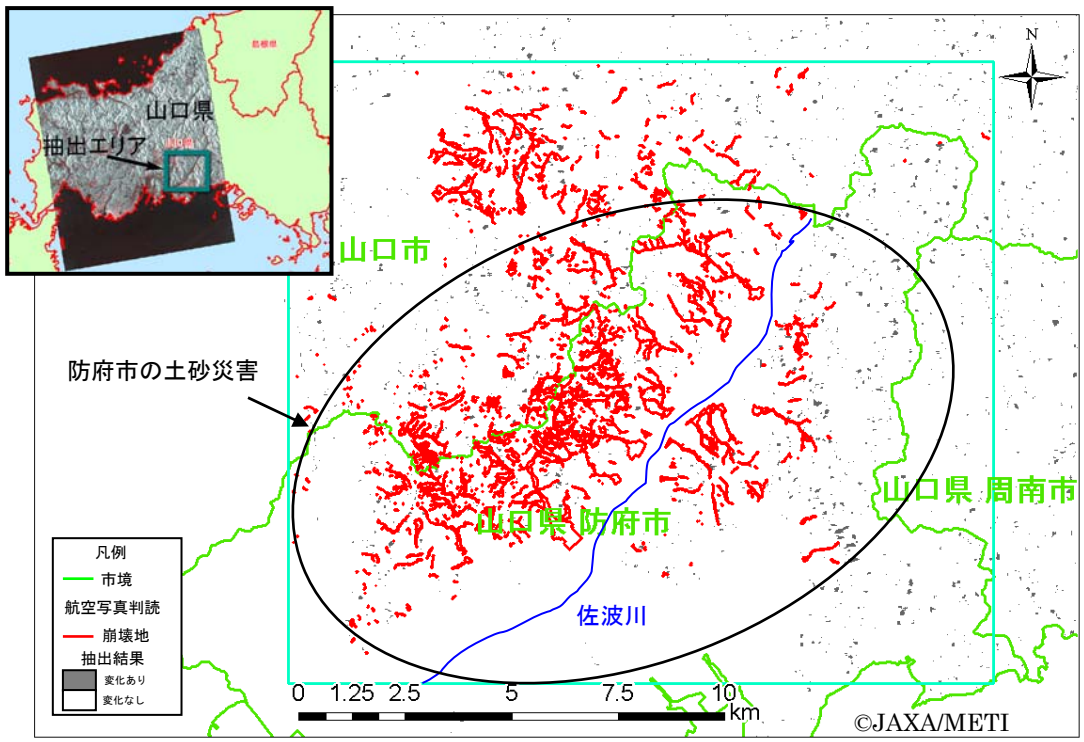
図－4.9　山口災害の相関係数差分解析のメッシュ集計

（観測日: 2007/10/9・2009/7/14・2009/8/12）

Fig. 4.9 Counting mesh units in landslide detection by correlation coefficient difference analysis in the Yamaguchi disaster

2) NDPI 差分解析

「NDPI 差分解析による抽出結果」と「災害後の航空写真から判読した崩壊地 GIS データ」を重ねた図を，図－4.10 に示す。



図－4.10 山口災害の NDPI 差分解析

（観測日:2009/7/14･2009/8/12，使用データは MEAN フィルタ後のデータ，10m 解像度，画像はすべて FBD，HH+HV，オフナディア角 34.3°，アセンディング，処理レベル 1.0）

Fig. 4.10 Results of landslide detection by NDPI difference analysis in the Yamaguchi disaster

相関係数差分解析の場合と同様に，航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率を表－4.8，また，SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率を表－4.9 に示す。

表－4.8 においては，20×20 メッシュ相当以上の崩壊地規模では，航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率は 85.7%である。10×10 メッシュ相当以上の崩壊地規模では，航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率は 71.9%である。一方，5×5 メッシュ相当未満の崩壊地規模では実際の崩壊数の増加に比して，抽出数が増加しなくなる傾向がある。表－4.9 においては，20×20 メッシュ相当以上の崩壊地規模が無く，10×10 メッシュ相当以上の崩壊地規模では，SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率は 22.9%である。5×5 メッシュ相当未満の崩壊地規模では SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率は 22%以下となる。

表－4.8　山口災害の NDPI 差分解析の航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率

Table 4.8 Recognition ratio of landslide detection based on landslides classified by interpretation of aerial photos by NDPI difference analysis in the area affected by the Yamaguchi disaster

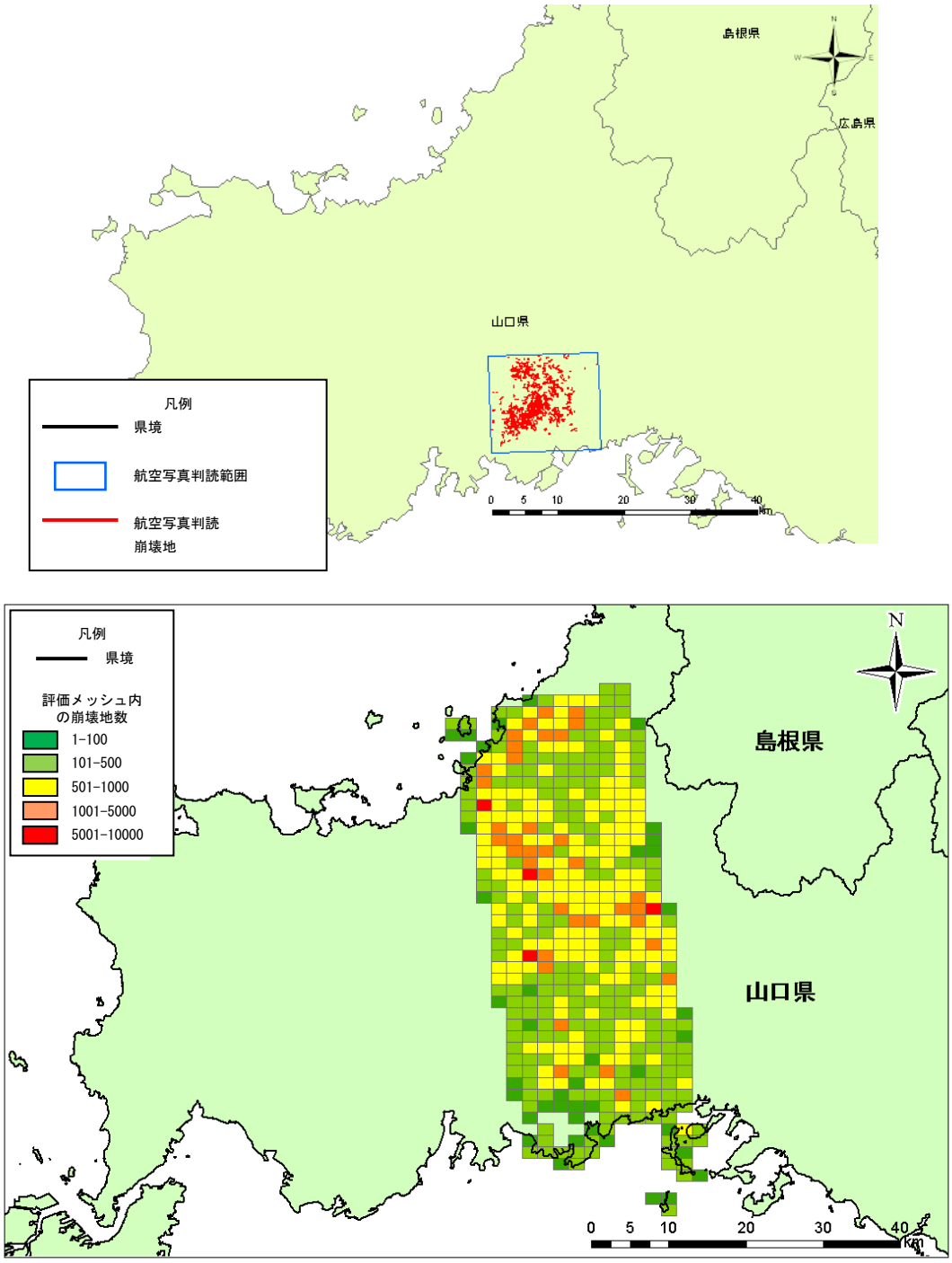
崩壊地面積の規模（m^2） （相当するメッシュ数）	崩壊数	抽出数	航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率= 抽出数/崩壊数
＞0 （すべての崩壊地）	723	130	18.0%
≧100 （1×1 相当以上）	705	130	18.4%
≧400 （2×2 相当以上）	617	127	20.6%
≧900 （3×3 相当以上）	450	123	27.3%
≧2,500 （5×5 相当以上）	244	102	41.8%
≧10,000 （10×10 相当以上）	96	69	71.9%
≧40,000 （20×20 相当以上）	28	24	85.7%

表－4.9　山口災害の NDPI 差分解析の SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率

Table 4.9 Recognition ratio of landslide detection based on analysis of SAR imagery by NDPI difference analysis in the area affected by the Yamaguchi disaster

崩壊地面積の規模（m^2） （相当するメッシュ数）	候補崩壊数	抽出数	SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率= 抽出数/候補崩壊数
＞0 （すべての崩壊地）	2,856	238	8.3%
≧100 （1×1 相当以上）	2,141	212	9.9%
≧400 （2×2 相当以上）	1,177	149	12.7%
≧900 （3×3 相当以上）	84	104	13.3%
≧2,500 （5×5 相当以上）	318	69	21.7%
≧10,000 （10×10 相当以上）	35	8	22.9%
≧40,000 （20×20 相当以上）	0	—	—

さらに，広域をみるために，岩手宮城内陸地震同様にメッシュ集計を行った結果を，図－4.11 に示す。広域でみると，相関係数差分解析よりは少ないものの，崩壊地以外の箇所が崩壊候補として抽出されていることが分かった。



図－4. 11　山口災害の NDPI 差分解析のメッシュ集計

（観測日: 2009/7/14・2009/8/12）

Fig. 4.11 Counting of mesh units in landslide detection by NDPI difference analysis in the Yamaguchi disaster

4.5　データ処理時間

本研究は，大規模土砂災害発生時の迅速な被害状況の把握に資することを目的としており，崩壊抽出に必要なデータ処理時間に着目した。使用したソフトウェア等の解析環境について，オルソ処理に ASF MapReady，相関係数差分解析，NDPI 差分解析に ERDAS IMAGINE 9.3，統計処理に ArcMAP を使用し，計算機の性能は OS： Windows XP, CPU：Intel Core2 Quad 2.83GHz，メモリ：3.25GB であった。今回対象とした 1 シーン内に含まれる約 300km^2 での相関係数差分解析および NDPI 差分解析ともに，崩壊抽出に必要な時間は，衛星データ入手後，両災害とも約 11.5 時間であった。簡易オルソ処理，崩壊地抽出のためのしきい値の事前設定等により精度を落とし即時性を優先すると，同 4 時間程度まで短縮できる。

4.6　精度評価

4.6.1　相関係数差分解析と NDPI 差分解析の結果比較

岩手宮城内陸地震，山口災害を対象に，PALSAR データを用いた相関係数差分解析と NDPI 差分解析のそれぞれを実施した結果について，実際の崩壊地が解析による抽出結果により捉えられているかという観点から航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率，過抽出の影響を評価するため，解析による抽出結果が実際の崩壊地を捉えているかという観点から SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率の２つの指標を用いて評価を行った。

岩手宮城内陸地震では，NDPI 差分解析の方が相関係数差分解析に比べ航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率が高いが，SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率に大きな差は無かった。山口災害においては，相関係数差分解析と NDPI 差分解析の間に航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率に大きな差は無かったが，相関係数差分解析の方が NDPI 差分解析に比べ SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率は高かった。

両手法とも，10×10 メッシュ相当（面積 10,000m^2 以上）の崩壊地規模で，60%以上の航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率で崩壊地を抽出できており，20×20 メッシュ相当（面積 40,000m^2 以上）の崩壊地規模で，約 80%以上の航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率で崩壊地を抽出できている。また，岩手宮城内陸地震では 3×3 メッシュ相当未満，山口災害では 5×5 メッシュ相当未満の崩壊地規模から実際の崩壊数の増加に比して，抽出数が減少する傾向が見られた。

両手法とも，山口災害では，SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率は 20×20 メッシュ相当（面積 40,000m^2 以上）の崩壊地規模で相関係数差分解析において 40%程度であり，NDPI 差分解析においては，崩壊地が抽出できていない。これは，山口災害では岩手宮城内陸地震に比べ，土石流が多く発生し，崩壊地の形状が細長いものが多く，そのような形状の崩壊地は，今回の解析手法では抽出が難しい可能性があることを示していると考えられる。

画像全体の広域での崩壊地抽出の評価では，定性的ではあるが，図－4.5, 4.7, 4.9，4.11 における崩壊地の分布とメッシュ集計結果の対応から，岩手宮城内陸地震での解析結果が山口県防府市周辺での豪雨災害での解析結果に比べて，実

際の崩壊箇所に即して崩壊地の抽出ができている。

4.6.2　斜面勾配の違いによる抽出結果への影響

SAR のマイクロ波は，衛星から地表に対し，斜めに照射される。急勾配斜面では，レイオーバー，フォアショートニング等による画像の歪みが生じ，抽出精度が低下する可能性が考えられるため，斜面勾配による抽出結果への影響について評価を実施した。国土地理院発行の数値地図 50m メッシュ（標高）から 10 度毎の傾斜区分図を作成し，評価に用いた。ここでは，岩手宮城内陸地震を対象に実施した NDPI 差分解析の事例を代表事例として精度評価の結果を述べる。他の解析結果についても，同様の傾向を確認している。

災害後の航空写真から判読した崩壊地個数と抽出により想定される崩壊地の数について斜面勾配ごとに比較し，崩壊地面積の規模毎に分類して整理を行った結果が表－4.10，4.11 である。ここでは，図－4.6，図－4.7 で解析を行った画像ペアに加え, 影響が偶発的なものでないかを確認する目的で観測日:2007/9/21・2008/9/23 の画像ペアの解析結果も追加している。崩壊地面積の規模が大きい場合は斜面勾配の影響に関係なく認識しており，また，崩壊地面積が小さい場合には斜面勾配に関係なく航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率が下がっている傾向が確認できる。このことから，今回の解析においては，航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率の観点から見ると，勾配の違いによる抽出結果の影響は特に見られず，崩壊地面積の規模による影響が大きかったものと考えられる。

表－4.10　崩壊地面積毎の傾斜勾配による航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率（%）　（岩手宮城内陸の NDPI 差分解析）（観測日: 2007/6/21･2008/9/23）

Table 4.10 Comparison of recognition ratio of landslide detection based on landslides classified by interpretation of aerial photos by slope gradient by landslide size category　(2007/6/21, 2008/9/23)

対象とした候補崩壊地面積の規模（m2）（相当するメッシュ数）	10度以下	10～20度	20～30度	30～40度	40～50度
＞0（すべての崩壊地）	29	116	141	73	17
	208	679	664	342	74
	13.9%	17.1%	21.2%	21.3%	23.0%
≧156.25（1×1相当以上）	28	116	141	73	17
	194	646	650	337	71
	14.4%	18.0%	21.7%	21.7%	23.9%
≧1406.25（3×3相当以上）	14	78	86	49	11
	32	160	210	116	21
	43.8%	48.8%	41.0%	42.2%	52.4%
≧3906.25（5×5相当以上）	3	51	49	30	4
	7	75	80	46	6
	42.9%	68.0%	61.3%	65.2%	66.7%
≧15625（10×10相当以上）	2	12	18	3	0
	2	14	20	3	0
	100.0%	85.7%	90.0%	100.0%	—
≧62500（20×20相当以上）	0	3	5	1	0
	0	3	5	1	0
	—	100.0%	100.0%	100.0%	—

上段：空中写真判読崩壊と一致した候補崩壊，中段：空中写真判読崩壊数，下段：航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率

50%以上
30%以上
10%以上

表－4.11　崩壊地面積毎の傾斜勾配による航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率（%）　（岩手宮城内陸の NDPI 差分解析）（観測日: 2007/9/21･2008/9/23）

Table 4.11 Comparison of recognition ratio of landslide detection based on landslides classified by interpretation of aerial photos by slope gradient by landslide size category (2007/9/21, 2008/9/23)

対象とした候補崩壊地面積の規模（m2）（相当するメッシュ数）	10度以下	10～20度	20～30度	30～40度	40～50度
＞0（すべての崩壊地）	23	113	145	77	15
	208	679	664	342	74
	11.1%	16.6%	21.8%	22.5%	20.3%
≧156.25（1×1相当以上）	23	112	144	77	15
	194	646	650	337	71
	11.9%	17.3%	22.2%	22.8%	21.1%
≧1406.25（3×3相当以上）	10	73	86	49	9
	32	160	210	116	21
	31.3%	45.6%	41.0%	42.2%	42.9%
≧3906.25（5×5相当以上）	4	51	51	31	4
	7	75	80	46	6
	57.1%	68.0%	63.8%	67.4%	66.7%
≧15625（10×10相当以上）	2	12	18	2	0
	2	14	20	3	0
	100.0%	85.7%	90.0%	66.7%	—
≧62500（20×20相当以上）	0	3	5	1	0
	0	3	5	1	0
	—	100.0%	100.0%	100.0%	—

上段：空中写真判読崩壊と一致した候補崩壊，中段：空中写真判読崩壊数，下段：航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率

50%以上
30%以上
10%以上

また，SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率の観点から，表－4.12，4.13 に整理した結果を示す。急勾配の斜面ではフォアショートニングの影響を受けて，抽出精度が低下する可能性があったが，表－4.12，表－4.13 ともに斜面勾配の大小についてみると，その影響は小さいことが分かり，斜面勾配が大きくなるにつれて SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率の向上が見られる。なお，レイオーバーは，オフナディア角 34.3 度から判断すると，斜面勾配が 55.7 度以上の斜面でしか生じないため，その影響は見られなかった。一方，崩壊地面積の規模の大小の観点からみると，メッシュ 5×5 相当よりメッシュ 10×10 以上の方が，明瞭に SAR 画像解析による抽出結果を正とした場合の認識率が高い。今回の解析においては，傾斜勾配の影響より，崩壊地面積の規模が大きく影響を与えていることがわかる。

表－4.12 候補崩壊地面積毎の傾斜勾配による SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率（%）（岩手宮城内陸の NDPI 差分解析）（観測日: 2007/6/21･2008/9/23）

Table 4.12 Comparison of recognition ratio of landslide detection based on analysis of SAR imagery by slope gradient in category of landslide size (2007/6/21, 2008/9/23)

対象とした候補崩壊地面積の規模（m2）（相当するメッシュ数）	10度以下	10～20度	20～30度	30～40度	40～50度
＞0（すべての崩壊地）	13	44	42	20	129
	709	578	301	90	349
	1.8%	7.6%	14.0%	22.2%	37.0%
≧156.25（1×1相当以上）	10	42	39	19	129
	581	498	258	78	345
	1.7%	8.4%	15.1%	24.4%	37.4%
≧1406.25（3×3相当以上）	3	29	21	10	126
	263	221	117	40	336
	1.1%	13.1%	17.9%	25.0%	37.5%
≧3906.25（5×5相当以上）	2	22	12	5	124
	97	94	46	18	312
	2.1%	23.4%	26.1%	27.8%	39.7%
≧15625（10×10相当以上）	0	0	4	0	71
	16	1	6	1	111
	0.0%	0.0%	66.7%	0.0%	64.0%
≧62500（20×20相当以上）	0	0	1	0	14
	1	0	1	0	15
	0.0%	—	100.0%	—	93.3%

上段：候補崩壊と一致した空中写真判読結果，中段：候補崩壊数，下段： SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率

50%以上
30%以上
10%以上

表－4. 13 候補崩壊地面積毎の傾斜勾配による SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率（%）（岩手宮城内陸の NDPI 差分解析）（観測日: 2007/9/21・2008/9/23）

Table 4.13 Comparison of recognition ratio of landslide detection based on analysis of SAR imagery by slope gradient in category of landslide size (2007/9/21, 2008/9/23)

対象とした候補崩壊地面積の規模（m2）（相当するメッシュ数）	10度以下	10～20度	20～30度	30～40度	40～50度
＞0（すべての崩壊地）	46	87	78	32	9
	756	840	433	173	26
	6.1%	10.4%	18.0%	18.5%	34.6%
≧156.25（1×1相当以上）	43	85	72	30	9
	652	720	364	145	26
	6.6%	11.8%	19.8%	20.7%	34.6%
≧1406.25（3×3相当以上）	38	73	60	26	7
	357	377	203	82	14
	10.6%	19.4%	29.6%	31.7%	50.0%
≧3906.25（5×5相当以上）	32	64	49	23	7
	181	216	120	51	11
	17.7%	29.6%	40.8%	45.1%	63.6%
≧15625（10×10相当以上）	9	26	26	11	3
	19	39	32	19	4
	47.4%	66.7%	81.3%	57.9%	75.0%
≧62500（20×20相当以上）	3	3	6	5	1
	6	3	6	5	1
	50.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%

上段：候補崩壊と一致した空中写真判読結果，中段：候補崩壊数，下段：SAR 画像解析による抽出結果を正とした場合の認識率

50%以上
30%以上
10%以上

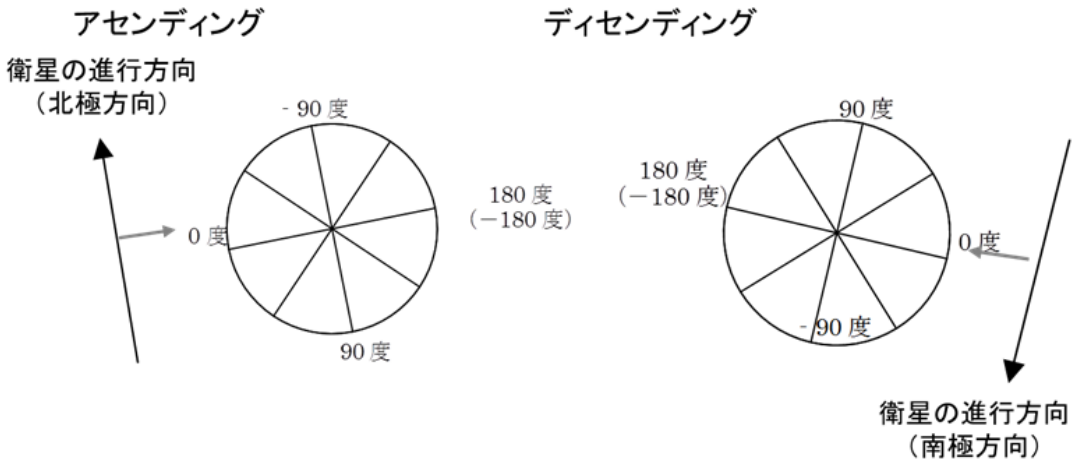
4.6.3　斜面方位の違いによる抽出結果への影響

ALOS の軌道には，衛星が北極方向に進行するものをアセンディング，南極方向に進行するものをディセンディングという 2 つの軌道がある。衛星と斜面の相対的な方位の関係により，山の陰においてレーダーシャドーが生じる等，抽出精度が低下する可能性が考えられるため，斜面方位の違いによる抽出結果への影響について評価を実施した。図－4.12 のように傾斜方向の定義は衛星方位角と斜面との相対方位角で定義をしている。ここでは，岩手宮城内陸地震を対象に実施した NDPI 差分解析の事例を代表事例として精度評価の結果を述べる。他の解析結果についても，同様の傾向を確認している。

災害後の航空写真から判読した崩壊地個数と抽出により想定される崩壊地の数について傾斜方向ごとに比較し，崩壊地面積の規模毎に分類して整理を行った結果が表－4.14，4.15 である。ここでは，図－4.6，図－4.7 で解析を行った画像ペアに加え, 影響が偶発的なものでないかを確認する目的で観測日:2007/9/21・2008/9/23 の画像ペアの解析結果も追加しており，ともにアセンディングの衛星軌道である。

崩壊地面積の規模が大きい場合は傾斜方向の影響に関係なく認識しており，崩壊地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，抽出精度が低下している傾向が見て取れる。今回の解析においては，傾斜方向の影響が特に崩壊地面積が小さい場合の抽出に影響を与えていることを示唆している。抽出精度の向上のためには，アセンディングのペア画像とディセンディングのペア画像の解析結果の組み合わせた解析を行う等の検討が今後必要であると考えられる。

また，SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率の観点から，表－4.16，4.17 に整理した結果を示す。表－4.16，表－4.17 ともに傾斜方向による SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率の差は大きく見られないが，崩壊地面積の違いによりメッシュ 5×5 相当よりメッシュ 10×10 以上の方が，明瞭に SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率が高い。



図－4.12　衛星軌道と傾斜方向の定義

Fig. 4.12 Definition of the path of artificial satellite and the slope direction

表－4.14 候補崩壊地面積毎の傾斜方向による航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率（%）（岩手宮城内陸の NDPI 差分解析）（観測日: 2007/6/21・2008/9/23）

Table 4.14　Comparison of recognition ratio of landslide detection based on landslides classified by interpretation of aerial photos by slope direction category of landslide size (2007/6/21, 2008/9/23)

対象とした候補崩壊地面積の規模（m2）（相当するメッシュ数）	−180〜−150度	−150〜−120度	−120〜−90度	−90〜−60度	−60〜−30度	−30〜0度	0〜30度	30〜60度	60〜90度	90〜120度	120〜150度	150〜180度
＞0（すべての崩壊地）	18	32	33	45	67	61	42	20	17	22	11	8
	163	209	236	217	183	168	121	97	142	171	154	106
	11.0%	15.3%	14.0%	20.7%	36.6%	36.3%	34.7%	20.6%	12.0%	12.9%	7.1%	7.5%
≧156.25（1×1相当以上）	18	32	33	45	66	61	42	20	17	22	11	8
	154	203	224	211	182	165	115	90	141	162	147	104
	11.7%	15.8%	14.7%	21.3%	36.3%	37.0%	36.5%	22.2%	12.1%	13.6%	7.5%	7.7%
≧1406.25（3×3相当以上）	14	18	23	31	41	35	24	9	13	16	11	3
	41	63	65	72	62	44	34	22	39	49	38	10
	34.1%	28.6%	35.4%	43.1%	66.1%	79.5%	70.6%	40.9%	33.3%	32.7%	28.9%	30.0%
≧3906.25（5×5相当以上）	7	10	13	19	26	15	15	5	8	11	6	2
	13	23	28	30	32	16	17	7	14	18	12	4
	53.8%	43.5%	46.4%	63.3%	81.3%	93.8%	88.2%	71.4%	57.1%	61.1%	50.0%	50.0%
≧15625（10×10相当以上）	1	1	2	2	9	4	2	2	4	4	4	0
	2	2	3	3	9	4	2	2	4	4	4	0
	50.0%	50.0%	66.7%	66.7%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	—
≧62500（20×20相当以上）	0	0	1	2	4	1	0	0	1	0	0	0
	0	0	1	2	4	1	0	0	1	0	0	0
	—	—	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	—	—	100.0%	—	—	—

上段：空中写真判読崩壊と一致した候補崩壊，中段：空中写真判読崩壊数，下段：航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率



50%以上
30%以上
10%以上

表－4. 15 候補崩壊地面積毎の傾斜方向による航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率（%）（岩手宮城内陸の NDPI 差分解析）（観測日: 2007/9/21・2008/9/23）

Table 4.15　Comparison of recognition ratio of landslide detection based on landslides classified by interpretation of aerial photos by slope direction category of landslide size (2007/9/21, 2008/9/23)

対象とした候補崩壊地面積の規模（m2）（相当するメッシュ数）	−180～−150度	−150～−120度	−120～−90度	−90～−60度	−60～−30度	−30～0度	0～30度	30～60度	60～90度	90～120度	120～150度	150～180度
＞0（すべての崩壊地）	21	31	37	49	53	56	45	22	19	23	12	5
	163	209	236	217	183	168	121	97	142	171	154	106
	12.9%	14.8%	15.7%	22.6%	29.0%	33.3%	37.2%	22.7%	13.4%	13.5%	7.8%	4.7%
≧156.25（1×1相当以上）	21	31	37	48	53	56	44	22	19	23	12	5
	154	203	224	211	182	165	115	90	141	162	147	104
	13.6%	15.3%	16.5%	22.7%	29.1%	33.9%	38.3%	24.4%	13.5%	14.2%	8.2%	4.8%
≧1406.25（3×3相当以上）	13	22	25	35	34	30	22	11	9	16	9	1
	41	63	65	72	62	44	34	22	39	49	38	10
	31.7%	34.9%	38.5%	48.6%	54.8%	68.2%	64.7%	50.0%	23.1%	32.7%	23.7%	10.0%
≧3906.25（5×5相当以上）	6	14	17	20	24	16	16	6	7	10	4	1
	13	23	28	30	32	16	17	7	14	18	12	4
	46.2%	60.9%	60.7%	66.7%	75.0%	100.0%	94.1%	85.7%	50.0%	55.6%	33.3%	25.0%
≧15625（10×10相当以上）	1	1	3	2	9	4	2	2	4	3	3	0
	2	2	3	3	9	4	2	2	4	4	4	0
	50.0%	50.0%	100.0%	66.7%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	75.0%	75.0%	—
≧62500（20×20相当以上）	0	0	1	2	4	1	0	0	1	0	0	0
	0	0	1	2	4	1	0	0	1	0	0	0
	—	—	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	—	—	100.0%	—	—	—

上段：空中写真判読崩壊と一致した候補崩壊，中段：空中写真判読崩壊数，下段：航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率



50%以上
30%以上
10%以上

表－4. 16 候補崩壊地面積毎の傾斜方向による SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率（%）（岩手宮城内陸の NDPI 差分解析）（観測日: 2007/6/21･2008/9/23）

Table 4.16　Comparison of recognition ratio of landslide detection based on analysis of SAR imagery by slope direction category of landslide size (2007/6/21, 2008/9/23)

対象とした候補崩壊地面積の規模（m2）（相当するメッシュ数）	−180～−150度	−150～−120度	−120～−90度	−90～−60度	−60～−30度	−30～0度	0～30度	30～60度	60～90度	90～120度	120～150度	150～180度
＞0（すべての崩壊地）	15	5	4	6	9	20	24	43	39	38	18	27
	134	90	123	93	127	187	224	278	250	216	155	150
	11.2%	5.6%	3.3%	6.5%	7.1%	10.7%	10.7%	15.5%	15.6%	17.6%	11.6%	18.0%
≧156.25（1×1相当以上）	15	4	4	6	9	20	24	43	37	35	17	25
	105	68	99	82	111	177	200	254	222	188	133	121
	14.3%	5.9%	4.0%	7.3%	8.1%	11.3%	12.0%	16.9%	16.7%	18.6%	12.8%	20.7%
≧1406.25（3×3相当以上）	10	3	2	5	8	14	21	38	30	31	12	15
	40	32	25	32	70	116	122	158	139	113	64	66
	25.0%	9.4%	8.0%	15.6%	11.4%	12.1%	17.2%	24.1%	21.6%	27.4%	18.8%	22.7%
≧3906.25（5×5相当以上）	9	3	1	4	6	10	17	36	29	28	11	11
	23	13	6	13	32	73	84	103	81	68	37	34
	39.1%	23.1%	16.7%	30.8%	18.8%	13.7%	20.2%	35.0%	35.8%	41.2%	29.7%	32.4%
≧15625（10×10相当以上）	5	0	0	0	2	6	8	19	17	12	5	1
	8	0	0	1	6	13	18	32	24	18	9	6
	62.5%	—	—	0.0%	33.3%	46.2%	44.4%	59.4%	70.8%	66.7%	55.6%	16.7%
≧62500（20×20相当以上）	0	0	0	0	0	1	2	5	1	4	2	0
	0	0	0	0	0	2	2	5	1	4	2	1
	—	—	—	—	—	50.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	0.0%

上段：候補崩壊と一致した空中写真判読結果,

中段：候補崩壊数，下段： SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率



50%以上
30%以上
10%以上

表－4. 17　候補崩壊地面積毎の傾斜方向による SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率（%）（岩手宮城内陸の NDPI 差分解析）（観測日: 2007/9/21･2008/9/23）

Table 4.17 Comparison of recognition ratio of landslide detection based on analysis of SAR imagery by slope direction category of landslide size (2007/9/21, 2008/9/23)

対象とした候補崩壊地面積の規模（m2）（相当するメッシュ数）	−180～−150度	−150～−120度	−120～−90度	−90～−60度	−60～−30度	−30～0度	0～30度	30～60度	60～90度	90～120度	120～150度	150～180度
＞0（すべての崩壊地）	12	8	8	7	15	15	29	36	37	34	25	26
	149	130	121	138	156	198	229	280	290	207	163	167
	8.1%	6.2%	6.6%	5.1%	9.6%	7.6%	12.7%	12.9%	12.8%	16.4%	15.3%	15.6%
≧156.25（1×1相当以上）	12	8	5	7	13	15	29	36	37	29	23	25
	115	104	87	119	136	187	199	258	246	178	143	135
	10.4%	7.7%	5.7%	5.9%	9.6%	8.0%	14.6%	14.0%	15.0%	16.3%	16.1%	18.5%
≧1406.25（3×3相当以上）	8	5	2	5	13	13	27	32	35	26	18	20
	45	36	31	50	74	116	123	159	150	102	69	78
	17.8%	13.9%	6.5%	10.0%	17.6%	11.2%	22.0%	20.1%	23.3%	25.5%	26.1%	25.6%
≧3906.25（5×5相当以上）	7	3	1	3	11	12	25	32	29	21	15	16
	23	12	8	19	44	65	80	106	86	58	39	39
	30.4%	25.0%	12.5%	15.8%	25.0%	18.5%	31.3%	30.2%	33.7%	36.2%	38.5%	41.0%
≧15625（10×10相当以上）	2	1	0	1	2	4	7	18	16	11	9	4
	3	1	0	1	6	13	14	27	21	12	10	5
	66.7%	100.0%	—	100.0%	33.3%	30.8%	50.0%	66.7%	76.2%	91.7%	90.0%	80.0%
≧62500（20×20相当以上）	0	0	0	0	0	2	0	4	4	3	3	2
	0	0	0	0	0	2	1	4	4	3	4	3
	—	—	—	—	—	100.0%	0.0%	100.0%	100.0%	100.0%	75.0%	66.7%

上段：候補崩壊と一致した空中写真判読結果,

中段：候補崩壊数，下段：SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率

50%以上
30%以上
10%以上

4.7　まとめと今後の課題

人工衛星により撮影された SAR 画像を用いた崩壊地抽出解析手法について，日本の陸域観測衛星 ALOS（だいち）の合成開口レーダーを用い，①平成 20 年岩手・宮城内陸地震，②平成 21 年 7 月 21 日山口県防府市土石流災害において，相関係数差分解析および NDPI 差分解析を用いて崩壊地の抽出を試みた。また，手法の適用性を確認するため，抽出結果について，実際の崩壊地との比較による抽出精度・抽出限界崩壊地規模の評価，画像全体の広域での抽出精度の評価，斜面勾配の影響の評価，斜面の傾斜方向の影響の評価を実施した。

その結果，相関係数差分解析および NDPI 差分解析ともに，ほぼ同程度の抽出精度を有しており，航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率は，面積 10,000m^2 以上の崩壊地で 60～80%程度（誤認識率 20～40%程度）であり，面積 40,000m^2 以上の崩壊地で 80%程度～100%（誤認識率 0～20%程度）であった。一方，過抽出の影響を評価するため，SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率は，面積 10,000m^2 以上の崩壊地で 20～40％程度（誤認識率 60～80%程度）であり，面積 40,000m^2 以上の崩壊地で 40%～80％程度（誤認識率 20～60%程度）であった。抽出限界崩壊地規模については，岩手宮城内陸地震では 3×3 メッシュ相当（面積 900m^2）未満，山口災害では 5×5（面積 2,500m^2）と推測された。

画像全体の広域での抽出精度の評価では，定性的ではあるが，岩手宮城内陸地震での抽出結果が山口災害に比べ，精度良く崩壊地が抽出できている。

斜面勾配の影響については，崩壊地面積の規模による影響が斜面勾配の影響より，抽出結果に大きく影響を与えており，斜面の傾斜方向の影響については，崩壊地面積が小さくなるに従って，衛星からの傾斜方向が遠ざかるにつれて，抽出精度が低下している傾向が見て取れた。

本手法の検討により、人工衛星 SAR 画像 1 シーンの約 300km^2 の範囲を悪天候時・夜間に関わらず 11.5 時間程度で調査可能となり，調査の時間短縮及び客観性・再現性を高め、精度向上を図れるという成果を得た。

今後の課題としては，今回の解析における誤抽出，抽出漏れに対する精度向上のための原因の把握及び解決策の検討，合成開口レーダーを用いて抽出可能な崩壊地の規模と特徴を検証し，抽出可能な条件を明らかにする等がある。

第 5 章　人工衛星 SAR 画像を用いた河道閉塞判読に関する研究

5.1　はじめに

2011 年 9 月，紀伊半島では台風 12 号による豪雨により 17 箇所の河道閉塞が形成された（国土交通省砂防部，2011d)。台風 12 号の豪雨による被災範囲は主に奈良県・和歌山県・三重県に及び広域であったが，台風 12 号通過後，悪天候が続いたため，崩壊による河道閉塞や土石流等の発生実態，被災状況の把握は困難であった。国土交通省による土砂災害防止法に基づく緊急調査の対象となった 5 箇所のうち，2 箇所（赤谷地区，栗平地区）の河道閉塞箇所については，緊急調査の前に，高分解能 SAR 衛星 TerraSAR-X の画像判読により，東西約 30km，南北約 50km に及ぶ約 1,500km^2 の範囲を約 29 時間で調査を行い，発見した（林ら，2012a)。

河道閉塞の形成状況の調査には，1.3 でも述べたように，広域を悪天候時・夜間においても調査可能な人工衛星により撮影された高分解能 SAR 画像を用いることが有効である。高分解能 SAR 画像を用いた土砂災害検知の取組としては，①下村ら（2008）による四川大地震の崩壊地の推定，林ら（2012a）の紀伊半島台風 12 号災害における河道閉塞箇所の発見等に見られる災害後の単画像の判読による手法がある。他に，災害前後の同一パス・入射角の画像の重ね合わせを用いる手法として，②２時期画像にカラー合成を行い，変化箇所を抽出するレイヤースタックによる手法（Suzuki *et al.*, 2008)，③強度画像差分解析（吉川ら，2009)，④２時期画像の相関係数の算出による手法（Yamazaki *et al.*, 2011)，⑤干渉処理による DEM 作成による災害前地形データとの差分解析（中野ら, 2011)，⑥地形変位を把握する DInSAR 解析（高岸, 2010）がある。また，⑦浦塚ら（2012）は航空機により撮影された SAR（Pi-SAR2，波長 X バンド）の偏波画像についてカラー合成による手法により，紀伊半島台風 12 号災害において，河道閉塞の抽出を試みている。これらのように災害前後の同一パス・入射角の画像を要する手法（②～⑥）は客観的な変化抽出ができる可能性があるものの，現時点では広大な面積の災害前画像のアーカイブ整備が必要であり，また，災害後の画像の撮影条件によっては直ちに解析を実施できない可能性がある。また，偏波画像のカラー合成による手法（⑦）については，偏波画像の撮影機会が少なく，偏波画像が撮影可能な衛星が限られている。航空機により撮影された SAR 画像

（⑦）については，常時撮影可能な体制が現時点では整備されていないという問題がある。

上記より，現時点では，人工衛星により撮影された高分解能 SAR 画像の判読が有用性の高い手法と考えられるが，台風 12 号災害における災害対応は一度きりの事例であり，より確実に河道閉塞箇所を判読する手法を確立するためには，以下の課題を解決する必要がある。

高分解能 SAR 画像の判読による河道閉塞箇所の判読は，判読を行う技術者により，見落とし，過抽出等，得られる結果が大きく異なることが予想される。そのため，判読者による大きな差が生じない客観性・再現性を高めるための標準的な判読基準の整理を行う必要がある。また，高分解能 SAR 衛星は，地球全体を周回しているため，常に任意の地点を撮影できる位置にいるとは限らない。加えて、衛星ごとに撮影間隔が異なるため，台風通過後，地震発生後等において，河道閉塞を速やかに判読するためには，台風 12 号において使用した TerraSAR-X（ドイツ，Xバンド）以外の高分解能衛星である COSMO-SkyMed（イタリア，X バンド）, RADARSAT-2（カナダ，C バンド）を含めて，利用可能性を検討する必要がある。さらに，衛星からマイクロ波を地上に向けて斜めにアンテナから照射し，地上からのエコーをアンテナからの距離に応じて記録するため不可視領域が生じるという高分解能 SAR 画像の特徴があるため，判読可能な高分解能 SAR 画像の撮影条件について明らかにしておく必要がある。

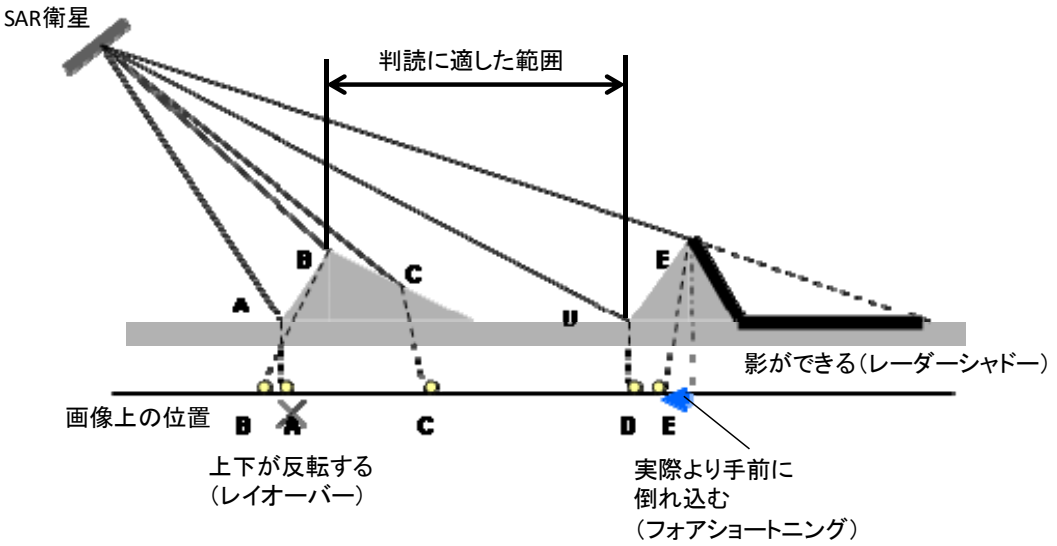
本章では，紀伊半島大水害時に発生した河道閉塞箇所を対象として，標準的な判読基準を作成し，現在運用中の異なる高分解能 SAR 衛星の画像，異なる撮影条件の画像を用いて，判読基準に基づいた河道閉塞箇所の視認性評価を行うことにより，判読に際して求められる高分解能 SAR 画像の撮影条件について検討を実施した（林ら，2013）。

5.2　判読手法

5.2.1　判読にあたって留意すべき SAR 画像の特徴

人工衛星の SAR は，マイクロ波が地上に対して斜めに照射されるため，図－5.1 に示すように，①急斜面等の上部が下部よりアンテナに近くなり画像が白くつぶれるレイオーバー（図－5.1 の A，B），高い山等が実際の平面位置よりアン

テナに近い位置に記録されるフォアショートニング（図－5.1 の E），マイクロ波が高い山等に遮られ影ができる（レーダーシャドー）等，SAR 画像に特徴的な現象が画像に現れる。そのため，1 枚の SAR 画像だけでは判読による河道閉塞箇所の判読に適した範囲が地形的に限られることになる。また，SAR 画像上において，水面はマイクロ波の鏡面反射により，衛星においてエコーが受信されないため黒く写る。マイクロ波の当たらない崩壊地の滑落崖は小さなレーダーシャドーとして黒く写る。



図－5.1　判読にあたって留意すべき SAR 画像の特徴と河道閉塞箇所判読に適した範囲

Fig. 5.1 Features of SAR sattelite imageries and range suited for imagery detection of landslide dams

5.2.2　標準的な判読基準の検討

SAR 画像を用いて河道閉塞箇所を判読する場合，判読すべき主要な河道閉塞の地形的特徴は，湛水域，崩壊地，河道を閉塞させる崩積土砂である。本研究では，紀伊半島大水害の災害対応に従事した判読技術者にヒアリングを実施し，台風 12 号災害対応時の実際の判読手順，5.2.1 で述べた判読にあたって留意すべき SAR 画像の特徴，上記の判読すべき地形的特徴を踏まえ，判読の際の重要な着眼点を標準的な判読基準としてとりまとめ，チェックリスト（表－5.1）を作成した。以下、各項目について説明を行う。

1)　確認範囲　河道：

チェック項目　湛水域

河道閉塞により形成される湛水域を判読する。湛水域は黒く写ることが想定されるが，上下流の河道幅と湛水域の幅の比較による確認，及び，ダム・取水堰等の人工構造物による湛水では無いこと確認する必要がある。

2)　確認範囲　周辺地形：

チェック項目　斜面勾配

湛水域が崩壊に由来するものか確認するため，崩壊が発生するような周囲の斜面の存在及び勾配を確認する必要がある。

3)　確認範囲　崩壊地：

チェック項目　滑落崖

崩壊地の存在を確認するために，滑落崖の存在，画像的特徴，形状等を確認する。

チェック項目　崩壊地内

滑落崖の下に崩壊形状が確認されるか，崩壊斜面の向きは斜面方向と整合しているかを確認する。

チェック項目　崩積土砂（河道閉塞部）

河道閉塞堆積物は，湛水面の直下流に谷を埋積するような形で舌状のマウンドが形成されており、河道閉塞と判断できる崩積土砂の存在・到達範囲を確認する。崩積土砂上の倒木の存在を確認できる場合がある。

チェック項目　崩壊規模

崩壊規模が河道閉塞を引き起こす程度か確認する。

チェック項目　画像の肌理

崩壊地内，崩積土砂等の表面は，森林との地被状況に違いから，森林に比べ平滑であることが多く，画像において判読可能な場合がある。

4)　確認範囲　相対的位置関係：

チェック項目　上下関係等

湛水域，崩壊地，河道を閉塞させる崩積土砂の位置関係等，上下関係等位置的な関係に矛盾が無いか確認する。

チェック項目　周辺地物

道路網の分断，建物の埋塞等を確認する。

実務的には，チェックリストは，以下のような活用を念頭においている。

・候補箇所ごとに作成する

・上から順に確認を行い，評価（〇，△，×）の三段階評価を行う。判読時は，迅速な判読が要求される一方において，判断に迷うことも多い。確実度が高いと判断出来る場合は〇、確実度が低い場合は△，確認できない場合は×と評価することとした。

・各項目の評価結果を参考に，判定を行う。すべての評価で（〇，△）が確認できる必要はない。判定についても，確実度が高いと判断出来る場合は〇、確実度が低い場合は△，確認できない場合は×と評価することとした。少しでも河道閉塞の懸念のある箇所は調査対象箇所（△）として判定する。

・判断根拠として保存する。

判読チェックリストは定性的な判読基準ではあるが，基準化により，判読者による判読結果の差異を大いに軽減することに資するものと考えられる。

表－5.1　判読チェックリスト

Table 5.1 Check list of detected landslide dams

○：抽出可能，△：抽出は困難だがある程度読み取れる，×：形状が読み取れない

確認順序

確認範囲	チェック項目	判断基準	評価
河道	湛水域	・湛水域と想定される暗い領域が確認されるか ・上下流の河道幅と比べ不自然な幅となっているか ・ダム・取水堰等の人工構造物による湛水では無いか	
周辺地形	斜面勾配	・湛水域近傍に崩壊が発生するような斜面は存在するか ・周辺斜面は崩壊が発生する程度の急勾配斜面か　等	
崩壊地	滑落崖	・湛水域周辺に滑落崖が確認できるか ・滑落崖周辺に段差によるシャドー・レイオーバーは確認できるか ・滑落崖の形状は斜面方向に対し円弧状となっているか　等	
	崩壊地内	・滑落崖の下に崩壊形状は確認されるか ・崩壊斜面の向きは斜面方向と整合しているか　等	
	崩積土砂 （河道閉塞部）	・崩壊地内から下部にかけて崩積土砂は確認できるか ・崩積土砂の形状は舌状になっているか ・崩積土砂の到達範囲は地形形状と整合しているか ・河道閉塞部は谷を埋積する形状となっているか ・河道閉塞部の上流に湛水域は形成されているか ・崩積土砂上に倒木等の形状は確認されるか　等	
	崩壊規模	・河道閉塞が発生する程度の崩壊規模か	
	画像の肌理	・崩壊地内・崩積土砂等の表面は周辺林地と比べ平滑になっているか ・周辺斜面にみられる強度パターンと違うパターンとなっているか　等	
相対的位置関係	上下関係等	・湛水域・滑落崖・崩積土砂等の位置関係に不自然さはないか　等	
	周辺地物	・周辺の道路網に分断はないか ・建物が埋積されているような状況は確認されるか	
判　定			

5.3　高分解能 SAR 画像の撮影条件の検討

河道閉塞箇所判読のための高分解能 SAR 画像の撮影条件を検討するため，撮影条件の異なる現在運用中の高分解能衛星 TerraSAR-X，COSMO-SkyMed，RADARSAT-2 の画像について，平成 23 年 9 月の台風 12 号による紀伊半島大水害における河道閉塞箇所に対し視認性の確認を行った。

視認性は，5.2.2 で作成した判読チェックリスト（表－5.1）に従った判読を行い，評価を行った（表－5.2)。評価に用いた河道閉塞箇所は国土交通省が確認し公表している 17 箇所（国土交通省砂防部，2011d）のうち，後述の画像の範囲内の 9 地区 11 箇所（坪内 3 箇所①②③，宇井④，長殿⑤，赤谷⑥，栗平⑦，野尻⑧，桧股⑩，北股⑭，三越⑮，丸囲み数字は国土交通省発表資料（国土交通省砂防部，2011d）中の箇所番号）である。

検討に用いた高分解能 SAR 画像は 9 画像である。全て単偏波 HH（衛星からのマイクロ波の送受信が水平偏波）の画像であり，各画像の処理レベルは，地図投影されたグランドレンジ画像（地形補正のためのオルソ処理をせず判読上

必要となる地形の倒れ込みを残したマイクロ波強度データ； TerraSAR-X ・COSMO-SkyMed は処理レベル名 GEC，RADARSAT-2 は処理レベル名 SSG）である。以下にそれぞれの画像，及び，関連する評価項目について，説明を行う。No.0 画像は，台風 12 号通過直後の TerraSAR-X 画像（林ら，2012a）であり，この画像での判読可否を視認性の目安とし，他画像との比較を行う際の基本画像とした。

1) レーダー照射方向の違い（No.0 と No.2，2’，3 の比較）

基本画像（No.0）は北行軌道・東向き照射であることから，逆向き照射（南行軌道・西向き）の場合について比較を行った。なお，北行軌道・南行軌道では撮影範囲が異なる。このため，基本画像の撮影範囲に含まれる河道閉塞位置を網羅するように TerraSAR-X 画像を 3 種類取得した（No.2, 2’, 3)。なお, No.2’画像 は No.2 の南側の画像である。

2) 入射角の違い（No.0 と No.4 の比較）

基本画像（No.0）は入射角 39° で取得した画像であるが，入射角が異なる場合について確認を行うために, TerraSAR-X で入射角 21° に設定した画像（No.4）を取得した。

3) センサの違い（No.2 と No.5 の比較）

基本画像（No.0）は TerraSAR-X 画像であり，X バンドの高分解能センサである。他センサの適用性について確認するために、同様に X バンド高分解能のセンサである COSMO-SkyMed の画像（No.5）を取得した。

4) バンド（波長）の違い（No.0 と No.6 の比較）

基本画像（No.0）は X バンド高分解能センサで取得した画像であるが，他バンドで取得した場合の適用性について確認するために, C バンド高分解能センサを有す RADARSAT-2 の画像（No.6）を取得した。

5) 分解能の違い（No.1 と No.2 の比較，及び，No.1 と No.6’の比較）

基本画像（No.0）は概ね 3m 分解能であるが，これよりも高分解能になった場合について確認するために，1.7m 分解能の TerraSAR-X 画像（SpotLight 画像）を取得した（No.1）。比較については， No.1 画像と同じレーダー照射方向である No.2 画像との比較を行った。

また，分解能が低くなった場合についても確認を行うため，RADARSAT-2 の画像（No.6）をリサンプリングし，8m 分解能の画像を作成し（No.6’）， No.0 画像との比較を行った。

表－5.2 単画像としての視認性評価結果一覧

Table 5.2 List of results of evaluations of landslide dam detection capability of each single imagery

衛星					TerraSAR-X						COSMO-SkyMed	RADARSAT-2	RADARSAT-2
画像No					0	1	2	2'	3	4	5	6	6'
撮影日					2011/9/5	2011/9/20	2011/10/6	2011/10/6	2011/11/19	2012/1/21	2011/9/10	2012/1/10	2012/1/10
軌道					北行軌道	南行軌道	南行軌道	南行軌道	南行軌道	北行軌道	南行軌道	北行軌道	北行軌道
照射方向					東向き	西向き	西向き	西向き	西向き	東向き	西向き	東向き	東向き
分解能					3m	1.7m	3m	3m	3m	3m	3m	3m	8m
入射角					39°	51°	37°	37°	39°	21°	34°	36°	36°
箇所No	箇所名	面積(ha)	方位	勾配(°)									
①	坪内	2.0	南東	32	○		×			×	×	○	×
②	坪内	11.8	東	31	○		×			×	×	○	△
③	坪内	5.2	北西	33	○		○			×	○	○	×
④	宇井	8.7	北東	38	○	×	×		×	×	×	○	○
⑤	長殿	19.5	北西	37	○	○	○		○	×	○	○	×
⑥	赤谷	28.2	北西	37	○	○	○		○	×	○	○	○
⑦	栗平	33.7	北	35	○		○			△	○	○	○
⑧	野尻	16.9	北西	36	×		△			×	△		
⑩	桧股	0.6	西	36	×				×				
⑭	北股	5.5	南西	35	×				△	×			
⑮	三越	6.3	北	36	○			×					
評価項目					基本	分解能	照射方向	照射方向	照射方向	入射角	センサ相違	Cバンド	分解能
		集計		①対象数	11	3	8	1	5	9	8	7	7
				②○	8	2	4	0	2	0	4	7	3
				③△	0	0	1	0	1	1	1	0	1
				④×	3	1	3	1	2	8	3	0	3
				視認可(②+③/①)	73%	67%	63%	0%	60%	11%	63%	100%	57%

5.4 評価結果と判読に求められる撮影条件

視認性評価に用いた各画像の単画像としての評価結果の一覧を表－5.2 に示す。また，それぞれの評価結果について，以下に説明を行う。評価結果の○△×の定義は，表－5.1 のチェックリストの定義と同じである。なお，基本画像において，台風 12 号災害対応（林ら，2012a）の際に，判読できていなかった三越の判読結果が○になっているが，これは，台風 12 号通過直後の判読では，湛水域をレーダーシャドーと誤判読していたが，今回，事後的に判読を行った結果，視認可能であったため○としている。

1)レーダー照射方向の違い

東向き照射画像（No.0）と西向き照射画像（No.2，2’，3 を組み合わせたもの）の視認性を比較した結果を表－5.3 に示す。表－5.3 での比較は，両画像に共通して存在する河道閉塞箇所を対象に比較を行っている。表には，東向き・西向きを組み合わせ，異なったレーダー照射方向の画像の判読を実施できた場合を想定した「両側」も示した。また，視認可（○もしくは△と定義）となる箇所数の割合を集計欄に示した。

表－5.3 より，片側のみの照射では東向きの視認性がやや高いが，両方向ともに概ね全体の 50～70%に該当する箇所を抽出することを確認した。また，両側から照射した場合は約 90%の抽出となって視認性がより向上する。

次に，河道閉塞を引き起こした深層崩壊発生斜面の方位と SAR 画像の視認性との関係を整理した図を図－5.2 に示す。上図は実際の河道閉塞箇所数を発生斜面の方位別に整理したものであり，下図は視認可能な河道閉塞箇所数について評価を行ったものである。図－5.2 より，東向き照射画像の場合は東向きの斜面における現象把握にやや優位であり，西向き照射画像の場合は西向きがやや優位である傾向が分かる。これは，レーダーの照射方向と斜面方位が同じであれば，図－5.1 に示したようにより多くの河道閉塞箇所が SAR 画像上の判読に適した範囲に存在するためと考えられる。両側の場合は双方の優位性が採用されることから，概ね全方位の把握が可能となる傾向となった。表－5.3，図－5.2 から，異なったレーダー照射方向の画像の判読が，河道閉塞の判読により有効な手法であることが示された。

現在，高分解能 SAR 画像の入手には，撮影オーダーから画像入手（判読開始前）まで，約 15 時間～数十時間要している。本研究の実施後，平成 26 年 5 月 24 日に JAXA による高分解能 SAR 衛星 ALOS-2 の打ち上げられており，今後，高分解能 SAR 画像の撮影オーダーから画像入手までの時間が，大幅に短縮される可能性がある。1 回の画像取得時間の短縮により相対的に調査頻度も増加するため，東西両側から観測することで判読の精度が高まると考えられる。

なお，両側でも把握できなかった箇所が 1 箇所（桧股⑩）存在するが，当該箇所は 1ha（10,000m^2）以下と崩壊面積が最小であり，崩壊規模が影響している可能性が考えられる。斜面勾配については，今回の検討の対象とした 11 箇所の斜面勾配は 31° ～37° であり，概ね同程度であった。今回の検討での勾配の幅

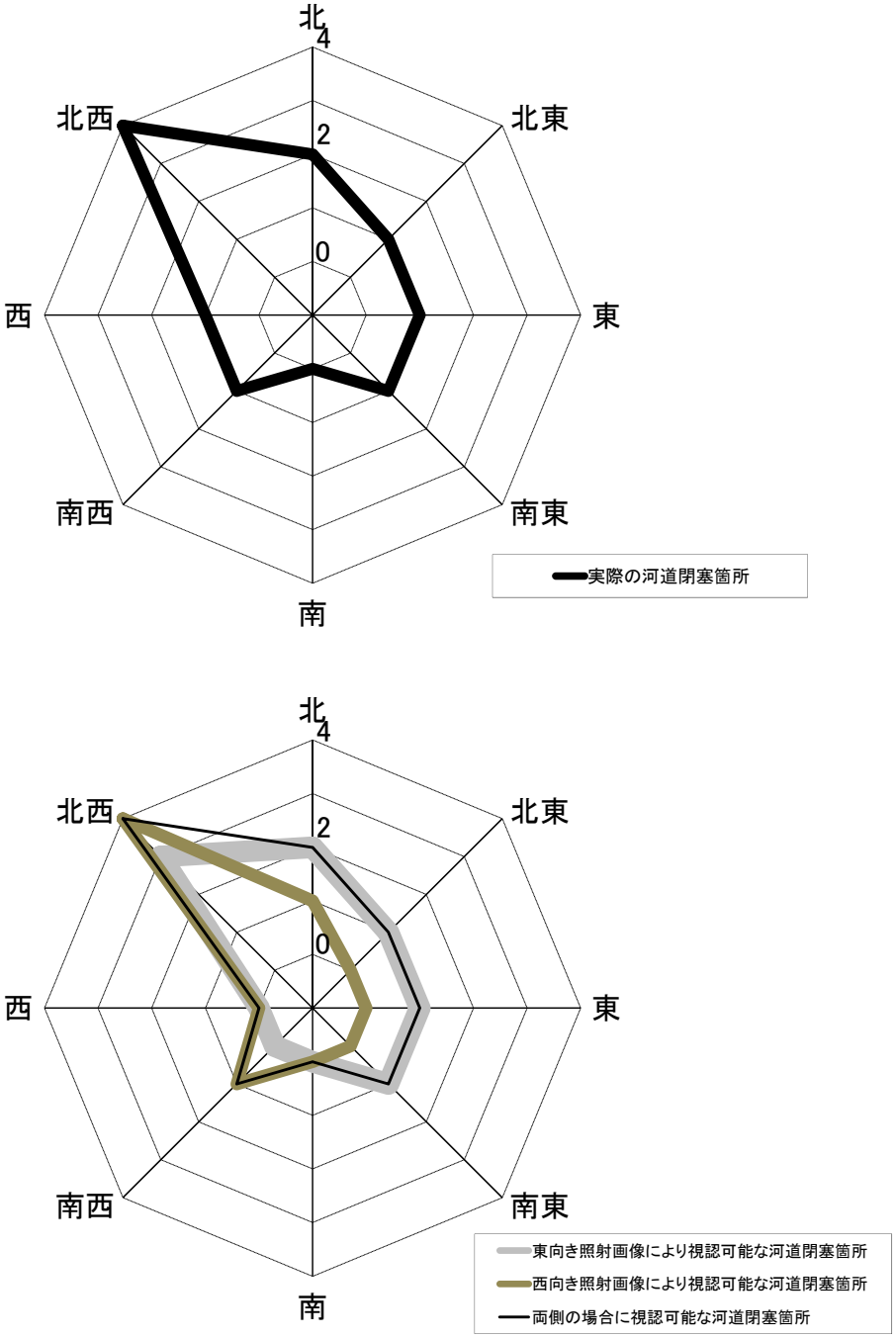
程度では河道閉塞箇所の抽出可否に差異はなかった。

参考として，レーダー照射方向の違いによる視認性の比較を示すため，図－5.3 に画像及び判読チェックリストを用いた評価結果を示す。図中の破線は崩壊地，湛水域の位置を示すものであり，矢印は河道閉塞が生じた河川の下流方向を示すものである。図－5.3 において，東向き照射画像では，河道の湛水域，崩壊地の滑落崖・崩壊形状・崩積土砂等の主要なチェック項目が視認可能と評価された。一方，西向き照射画像では，河道の湛水域は視認可能と評価されるものの，他の主要なチェック項目は視認可能と評価されなかった。

表－5.3　レーダー照射方向の違いによる判読結果の比較

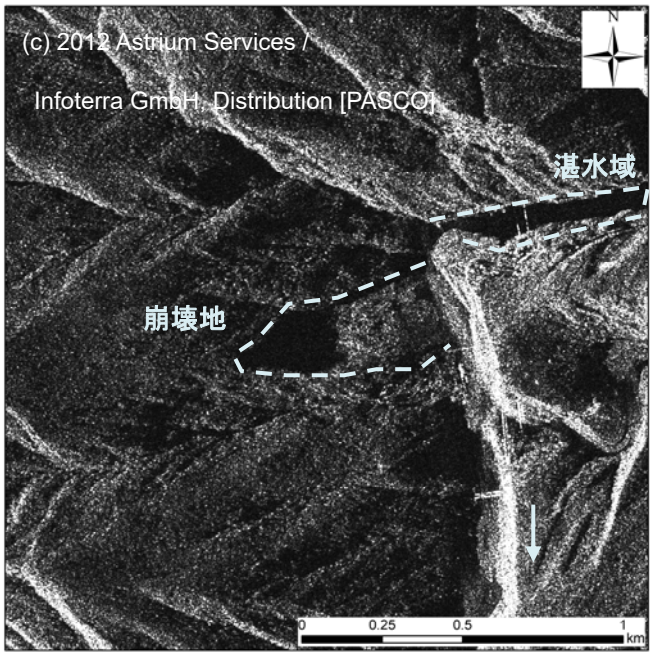
Table 5.3 Comparison of results of evaluations of landslide dam detection capability with different radar direction imageries

				衛星	TerraSAR-X		
				画像No.	No.0	No.2,2',3	No.0,2,2',3
箇所No	箇所名	面積(ha)	方位	勾配(°)	東向き	西向き	両側
①	坪内	2.0	南東	32	○	×	○
②	坪内	11.8	東	31	○	×	○
③	坪内	5.2	北西	33	○	○	○
④	宇井	8.7	北東	38	○	×	○
⑤	長殿	19.5	北西	37	○	○	○
⑥	赤谷	28.2	北西	37	○	○	○
⑦	栗平	33.7	北	35	○	○	○
⑧	野尻	16.9	北西	36	×	△	△
⑩	桧股	0.6	西	36	×	×	×
⑭	北股	5.5	南西	35	×	△	△
⑮	三越	6.3	北	36	○	×	○
		集計		①対象数	11	11	11
				②○	8	4	8
				③△	0	2	2
				④×	3	5	1
				視認可(②＋③/①)	73%	55%	91%



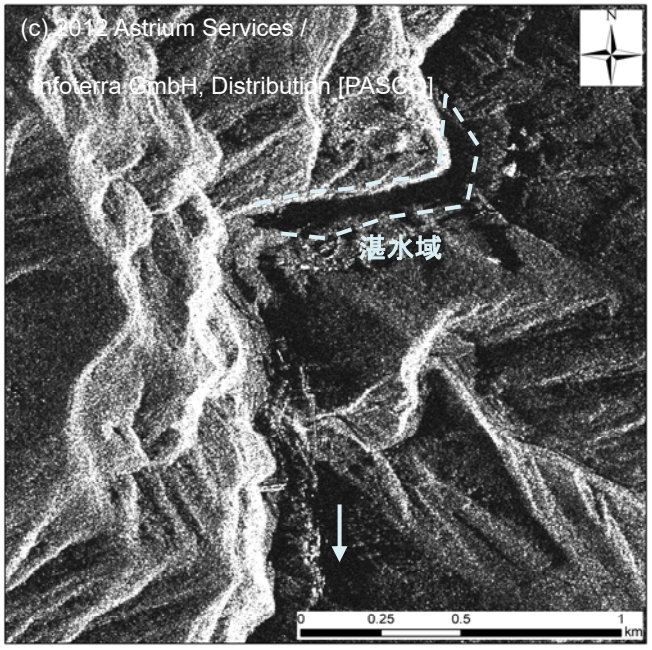
図－5.2　崩壊発生斜面方位と視認性との関係

Fig. 5.2 Relationship between landslide delections and landslide dam detection capability



確認範囲	チェック項目	評価
河道	湛水域	○
周辺地形	斜面勾配	○
崩壊地	滑落崖	○
	崩壊地内	△
	崩積土砂	○
	崩壊規模	○
	画像の肌理	○
相対的位置関係	上下関係等	○
	周辺地物	×
判定		○

宇井④　画像番号 No.0,
東向き照射，視認性○



確認範囲	チェック項目	評価
河道	湛水域	○
周辺地形	斜面勾配	○
崩壊地	滑落崖	×
	崩壊地内	×
	崩積土砂	×
	崩壊規模	×
	画像の肌理	×
相対的位置関係	上下関係等	×
	周辺地物	×
判定		×

宇井④　画像番号 No.2,
西向き照射，視認性×

図－5.3　レーダー照射方向の違いによる視認性の比較

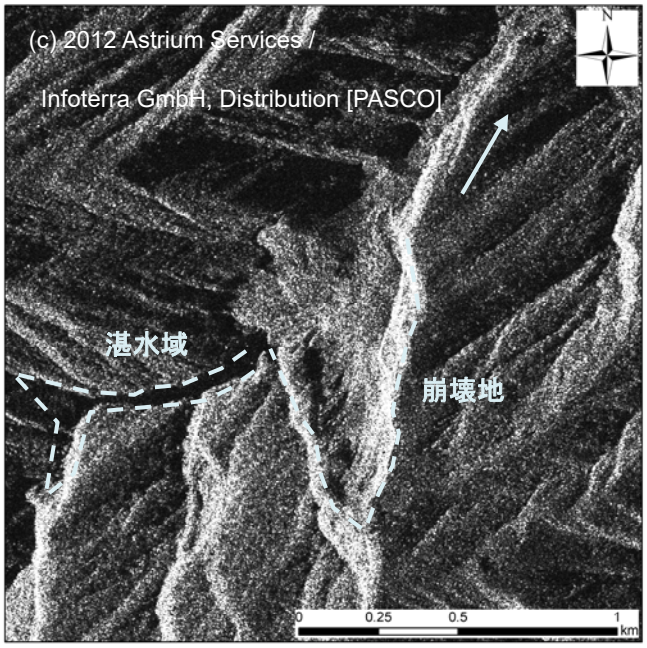
Fig. 5.3 Comparison of landslide dam detection capability of different radar direction imageries

2)入射角

入射角の異なる２画像（No.0，No.4）の視認性を比較した。両画像に共通して存在する河道閉塞箇所を対象に比較を行った場合，入射角 39°の基本画像では約 80%の河道閉塞箇所を抽出したが，入射角 21°の画像では約 10%程度となり，抽出精度が著しく低下する傾向が確認された（表－5.2)。これは，入射角が小さくなると幾何歪みが大きくなり，地形の倒れ込み等が激しくなることから，河道閉塞箇所を視認することが困難になるためである。

ここで比較した No.0，No.4 以外の画像も入射角はそれぞれ若干異なるが（表－5.2，最低 34°，最高 51°），No.0，No.4 の比較のような視認性の差は確認されなかった。

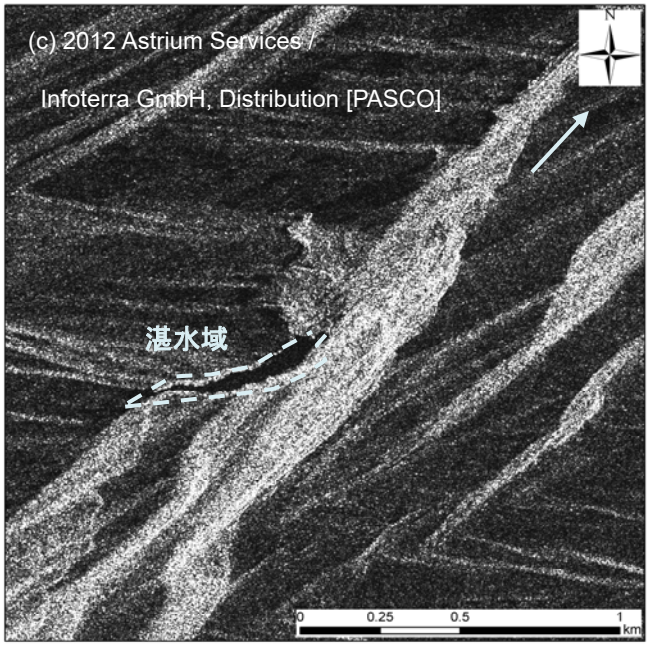
上記結果より，SAR 画像取得時の入射角は，概ね 35°～50°程度が望ましいといえる。参考として，入射角の違いによる視認性の比較を示すため，図－5.4 に画像及び判読チェックリストを用いた評価結果を示す。図－5.4 において，No.0 では，河道の湛水域，崩壊地の滑落崖・崩壊形状・崩積土砂等の主要なチェック項目が視認可能と評価された。一方，No.4 では，河道の湛水域，崩壊地の崩積土砂は視認可能と評価されるものの，他の主要なチェック項目は視認可能と評価されなかった。



確認範囲	チェック項目	評価
河道	湛水域	○
周辺地形	斜面勾配	○
崩壊地	滑落崖	○
	崩壊地内	○
	崩積土砂	○
	崩壊規模	○
	画像の肌理	○
相対的位置関係	上下関係等	○
	周辺地物	×
判定		○

赤谷⑥　画像番号 No.0,

入射角 39°，視認性○



確認範囲	チェック項目	評価
河道	湛水域	○
周辺地形	斜面勾配	○
崩壊地	滑落崖	×
	崩壊地内	×
	崩積土砂	○
	崩壊規模	×
	画像の肌理	×
相対的位置関係	上下関係等	×
	周辺地物	×
判定		×

赤谷⑥　画像番号 No.4,

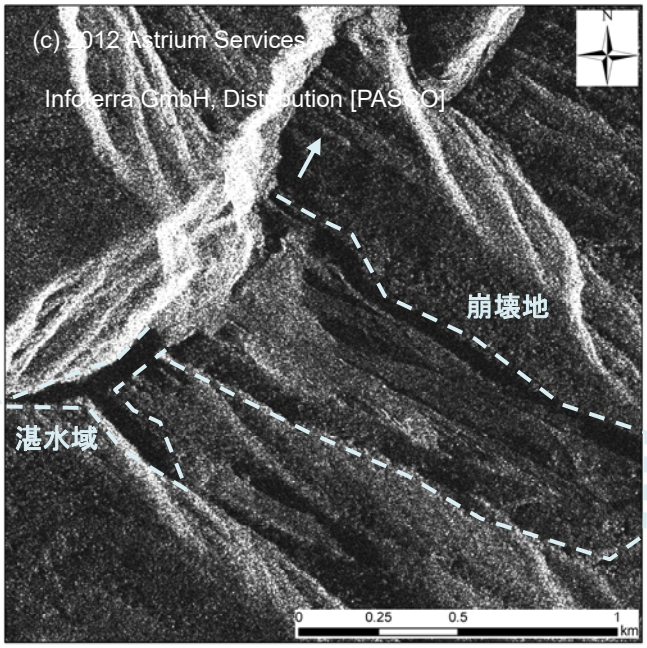
入射角 21°，視認性×

図－5.4　入射角の違いによる視認性の比較

Fig. 5.4 Comparison of landslide dam detection capability of different radar angle imageries

3)センサ（衛星）の違い

同じ X バンドのマイクロ波を利用するが, センサが異なる TerraSAR-X（No.2）と COSMO-SkyMed（No.5）との視認性比較を行った結果を表－5.2 に示す。なお，TerraSAR-X 画像は，COSMO-SkyMed と照射方向が同じであり，撮影範囲も類似する No.2 画像を比較対象とした。表より，比較対象となった８箇所の河道閉塞についていずれのセンサも約 60%程度を抽出しており，両者間に差異は確認されない。上記より，センサの違いによる視認性の差はないといえる。参考として，センサの違いによる視認性の比較を示すため，図－5.5 に画像及び判読チェックリストを用いた評価結果を示す。図－5.5 において, No.2, No.5 ともに，河道の湛水域，崩壊地の滑落崖・崩壊形状・崩積土砂等の主要なチェック項目が視認可能と評価されている。

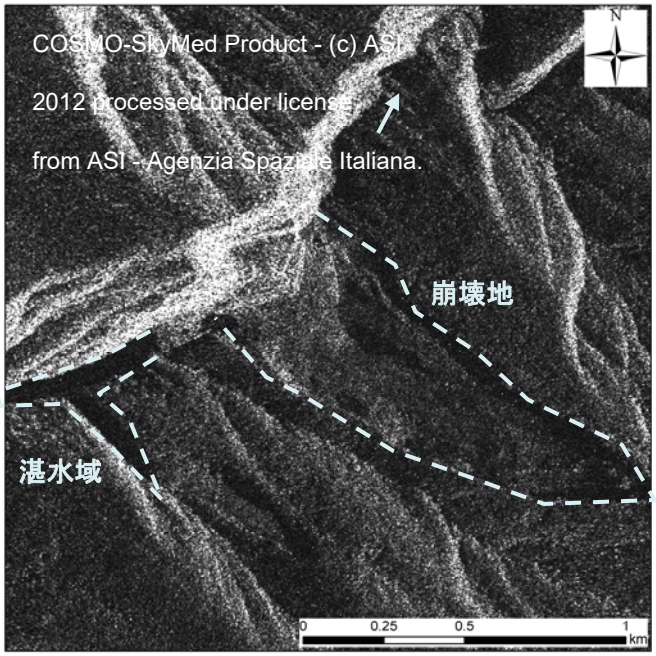


確認範囲	チェック項目	評価
河道	湛水域	○
周辺地形	斜面勾配	○
崩壊地	滑落崖	○
	崩壊地内	○
	崩積土砂	○
	崩壊規模	○
	画像の肌理	○
相対的位置関係	上下関係等	○
	周辺地物	×
判定		○

赤谷⑥　画像番号 No.2,

衛星 TerraSAR-X,

視認性○



確認範囲	チェック項目	評価
河道	湛水域	○
周辺地形	斜面勾配	○
崩壊地	滑落崖	○
	崩壊地内	○
	崩積土砂	○
	崩壊規模	○
	画像の肌理	○
相対的位置関係	上下関係等	○
	周辺地物	×
判定		○

赤谷⑥　画像番号 No.5,

衛星 COSMO-SkyMed,

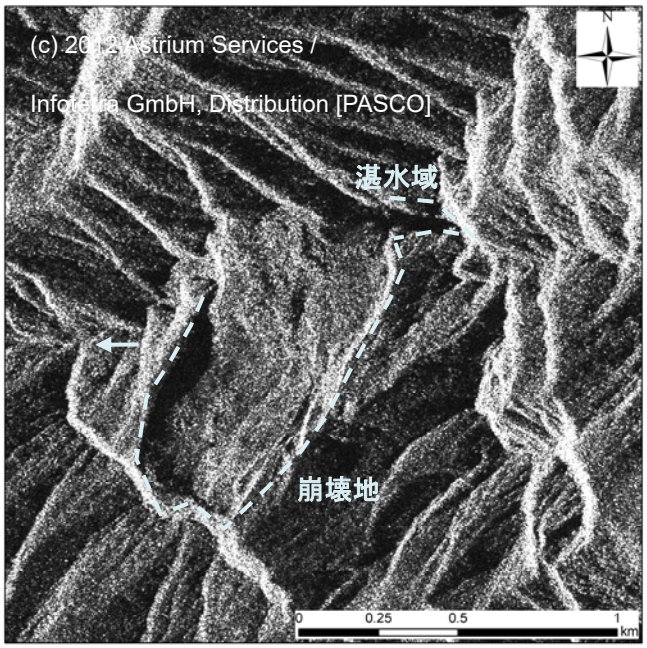
視認性○

図－5.5　センサの違いによる視認性の比較

Fig. 5.5 Comparison of landslide dam detection capability of different radar sensor imageries

4)バンド（波長）の違い

X バンドセンサを有す TerraSAR-X（No.0）と C バンドセンサを有す RADARSAT-2（No.6）との視認性を比較した。両画像に共通して存在する河道閉塞箇所を対象に比較を行った場合，個別の箇所を比較すると，RADARSAT-2 の方が画像がやや粗く見えるという差はあるが，比較対象となった 7 箇所の河道閉塞についていずれのセンサも全て抽出しており，両者間に差異は確認されない（表－5.2)。上記より，X バンドと C バンドの違いによる視認性の差は，河道閉塞の抽出精度としては大きな差は生じていないといえる。参考として，バンドの違いによる視認性の比較を示すため，図－5.6 に画像及び判読チェックリストを用いた評価結果を示す。図－5.6 において，No.0，No.6 ともに，河道の湛水域，崩壊地の滑落崖・崩壊形状・崩積土砂等の主要なチェック項目が視認可能と評価されている。

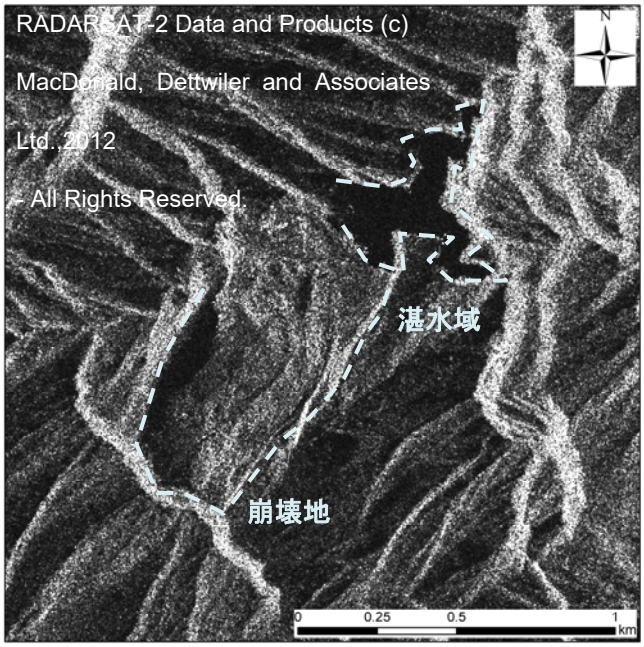


確認範囲	チェック項目	評価
河道	湛水域	○
周辺地形	斜面勾配	○
崩壊地	滑落崖	○
	崩壊地内	○
	崩積土砂	○
	崩壊規模	○
	画像の肌理	○
相対的位置関係	上下関係等	○
	周辺地物	×
判定		○

栗平⑦　画像番号 No.0,

衛星 TerraSAR-X,

X バンド，視認性○



確認範囲	チェック項目	評価
河道	湛水域	○
周辺地形	斜面勾配	○
崩壊地	滑落崖	○
	崩壊地内	○
	崩積土砂	○
	崩壊規模	○
	画像の肌理	○
相対的位置関係	上下関係等	○
	周辺地物	×
判定		○

栗平⑦　画像番号 No.6,

衛星 RADARSAT-2,

C バンド，視認性○

図－5.6　バンドの違いによる視認性の比較

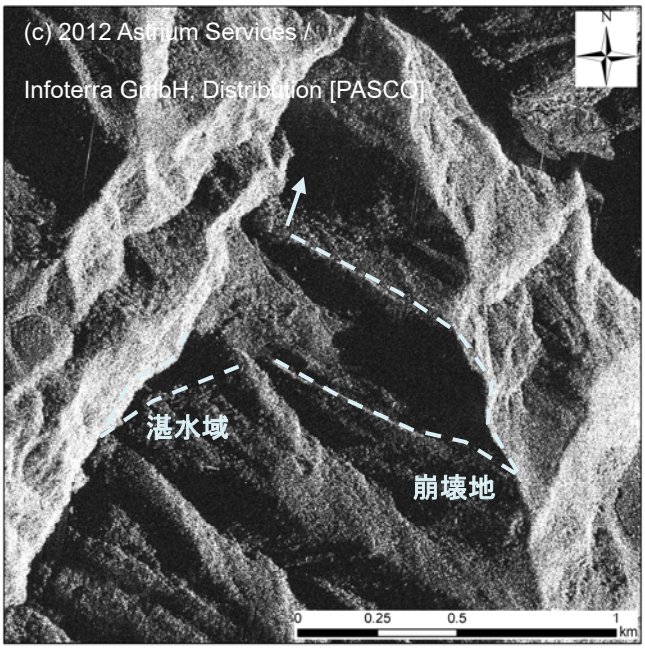
Fig. 5.6　Comparison of landslide dam detection capability of different radar band imageries

5)分解能の違い

5)－１　高分解能画像との比較

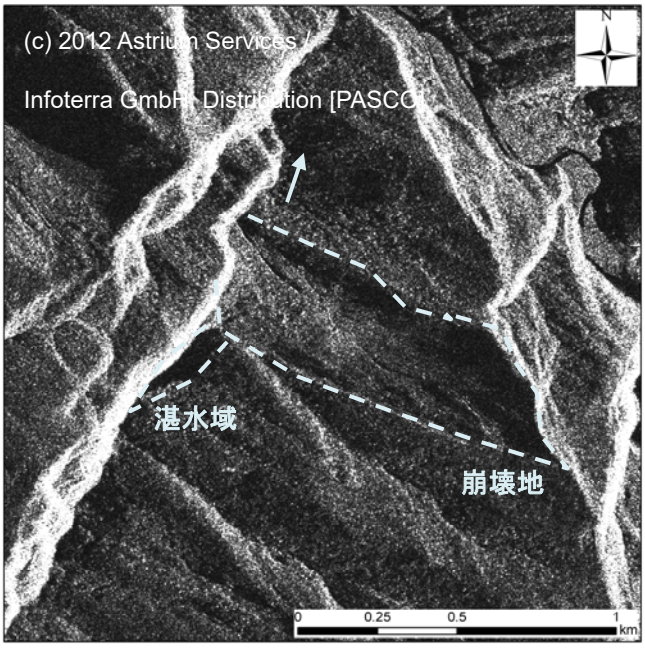
高分解能（No.1，分解能 1.7m）画像と基本画像（No.0）と同じ分解能（3.0m）の画像であり, かつ, レーダー照射方向も同一の No.2 画像の視認性を比較した。No.1 の取得範囲に含まれる河道閉塞 3 箇所について比較した結果（表－5.2），高分解能画像では崩積土上の倒木が確認されるなど，より詳細な現地状況を把握可能であった。しかし，河道閉塞の有無に関する視認性については，いずれの画像も 2 箇所抽出となっており，その差は無いことを確認した。

なお，今回用いた高分解能画像は TerraSAR-X の Spot Light 画像であり，撮影範囲は 10km×5km 程度と 3m の分解能の画像（StripMap 撮影範囲：50km×30km）に比べ狭い。このため，広域を対象とした河道閉塞箇所の判読を行う上では，3m 分解能画像の方が効率性は高いといえる。参考として，分解能の違いによる視認性の比較を示すため，図－5.7 に画像及び判読チェックリストを用いた評価結果を示す。図－5.7 において，No.1，No.2 ともに，河道の湛水域，崩壊地の滑落崖・崩壊形状・崩積土砂等の主要なチェック項目が視認可能と評価されている。



確認範囲	チェック項目	評価
河道	湛水域	○
周辺地形	斜面勾配	○
崩壊地	滑落崖	○
	崩壊地内	○
	崩積土砂	○
	崩壊規模	○
	画像の肌理	○
相対的位置関係	上下関係等	○
	周辺地物	×
判定		○

長殿⑤　画像番号 No.1,
衛星 TerraSAR-X,
分解能 1.7m，視認性○



確認範囲	チェック項目	評価
河道	湛水域	○
周辺地形	斜面勾配	○
崩壊地	滑落崖	○
	崩壊地内	○
	崩積土砂	○
	崩壊規模	○
	画像の肌理	○
相対的位置関係	上下関係等	○
	周辺地物	×
判定		○

長殿⑤　画像番号 No.2,
衛星 TerraSAR-X,
分解能 3m，視認性○

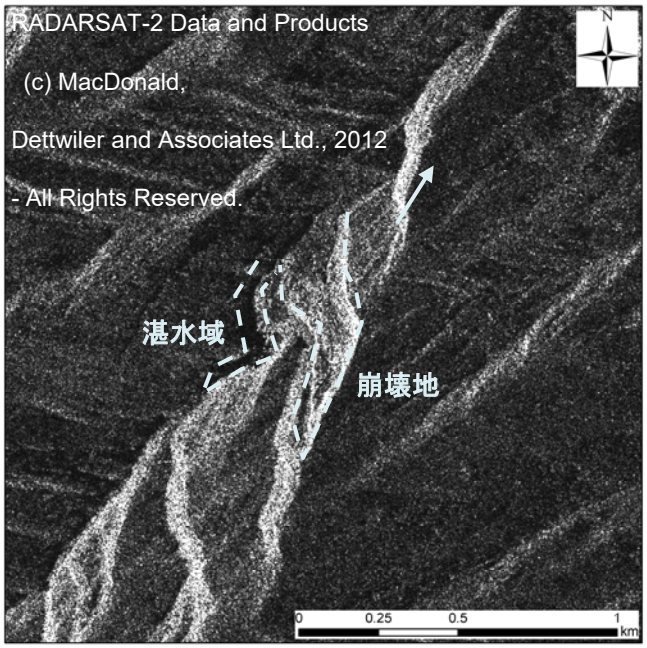
図－5.7　分解能の違いによる視認性の比較（高分解能画像との比較）

Fig. 5.7　Comparison of landslide dam detection capability of different radar resolution imageries (for high-resolution)

5)－２　低分解能画像との比較

画像が低分解能になれば撮影範囲は広くなり（例えば，TerraSAR-X Scan SAR 分解能：約 19m，撮影範囲：100km×150km），より広域を対象とした河道閉塞箇所の判読を行うことが期待できる。低分解能（No.6’，分解能 8.0m）画像と基本画像（No.0）の分解能（3.0m）との視認性を比較した結果を表－5.2 に示す。なお，基準とする画像は基本画像と同じ分解能で，低分解能画像を作成した基画像である RADARSAT-2 の No.6 画像とした。比較対象とした河道閉塞 7 箇所について，3.0m 分解能では全て抽出可能と判断されたが，低解像度ではその半数程度の抽出結果となった。視認性が低下しない最低分解能については，今回の検討では少なくとも分解能 8m 以上では，視認性が大きく低下する可能性が示された。参考として，分解能の違いによる視認性の比較を示すため，図－5.8 に画像及び判読チェックリストを用いた評価結果を示す。図－5.8 において，No.6 では，河道の湛水域，崩壊地の滑落崖・崩壊形状・崩積土砂等の主要なチェック項目が視認可能と評価された。一方，No. 6’では，それらの主要なチェック項目は視認が難しいと評価されている。

5)－１，２の比較結果より，河道閉塞を抽出する際の SAR 画像の分解能は，3m 以下であることが望ましく，それよりも低分解能では，抽出は難しくなると考えられる。

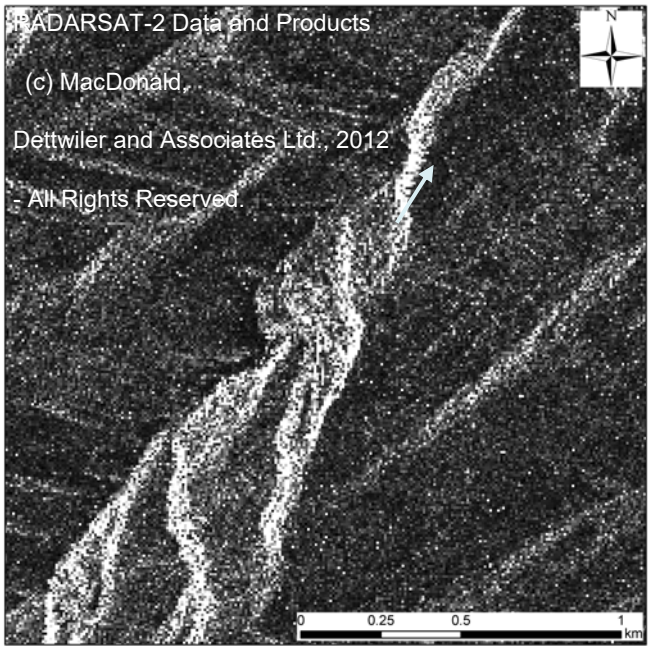


確認範囲	チェック項目	評価
河道	湛水域	○
周辺地形	斜面勾配	○
崩壊地	滑落崖	○
	崩壊地内	○
	崩積土砂	○
	崩壊規模	○
	画像の肌理	○
相対的位置関係	上下関係等	○
	周辺地物	×
判定		○

長殿⑤　画像番号 No.6,

衛星 RADARSAT-2,

分解能 3m，視認性○



確認範囲	チェック項目	評価
河道	湛水域	△
周辺地形	斜面勾配	○
崩壊地	滑落崖	△
	崩壊地内	△
	崩積土砂	△
	崩壊規模	△
	画像の肌理	△
相対的位置関係	上下関係等	△
	周辺地物	×
判定		×

長殿⑤　画像番号 No.6’,

衛星 RADARSAT-2,

分解能 8m，視認性×

図－5.8　分解能の違いによる視認性の比較（低分解能画像との比較）

Fig. 5.8　Comparison of landslide dam detection capability of different radar resolution imageries (for low-resolution)

6)判読を困難とするその他の要因

今回検討を行った 11 箇所のうち，全ての画像において視認性が○とならなかった箇所は野尻⑧，桧股⑩，北股⑭の 3 箇所である。このうち，桧股⑩は画像の分解能に比して，崩壊規模が小さいことが主な要因と考えられる。その他 2 箇所の内，野尻⑧は土石流に起因する河道閉塞であり，崩壊地と河道閉塞が近接していないため，関連性を確認することが困難であった。さらに、流下域は周囲の谷地形と同じパターンを示すため土石流流下区間として判読することが困難であった。また，十津川本川上に河道閉塞が存在したが，画像上では，すでに決壊済みであったため，判読することができなかった。北股⑭については，崩壊は読みとれたが，閉塞部分の川幅が狭く明瞭に湛水を確認することができず，判定の結果，河道閉塞と認識できなかった。

5.5 まとめ

本章では，今後の災害対応での活用のため，平成 23 年 9 月紀伊半島台風 12 号災害を事例に，夜間や悪天候時においても地表の状態を観測可能な高分解能 SAR 画像の単画像の判読による河道閉塞箇所判読手法の確立を目指し，河道閉塞の地形的特徴と実際の災害対応時の判読手順から標準的な判読基準としてチェックリストを作成し，そのチェックリストを用いて，現在運用中の高分解能 SAR 衛星の画像に対し，紀伊半島大水害時に発生した河道閉塞箇所を対象に，撮影条件の各設定項目について，視認性を評価することにより，その設定範囲を示した。今回の検討により，得られた撮影条件の設定範囲等を以下に示す。①レーダー照射方向（東向き・西向き）によらず，今回の検討では，画像内の河道閉塞箇所のうち 50～70%を抽出できた。②画像取得時の入射角は，概ね 35°～50°程度が望ましい。③画像の分解能は，3m 以下であることが望ましい。④高分解能 SAR 衛星 TerraSAR-X のみならず， COSMO-SkyMed，RADARSAT-2 の画像においても，河道閉塞箇所の抽出は可能であった。上記の衛星が活用可能な撮影条件を示し，また，3 つの高分解能 SAR 衛星画像から河道閉塞箇所の抽出が可能であることを示したことから，調査可能な人工衛星は 6 機となり，調査頻度は 6 倍程度に増えることから，調査の時間短縮及び精度向上を図る成果を得た。

本章で実施した検討では，分析事例が少ない等により，撮影条件の各設定項目が具体的・定量的にどのように視認性に影響を与えているか等の詳細な分析を行うことはできなかったものの，実務面での有用性ある撮影条件の各設定項目を示すことができたと考えている。

第 6 章　総合考察

6.1　本研究で得られた成果

本研究では，広域土砂災害の被害状況把握における課題である①最大被害を推定する指標の作成，②河道閉塞や土石流の発生実態調査の時間短縮及び精度向上の二つの課題を解決するため，まず，第 1 章において，広域土砂災害の既往対応事例の調査から上記①②が課題であることを示し，①について，既往の災害対応では個別の災害に特徴的な指標に関する調査結果を過去の災害事例と比較することによる評価が行われており，特徴的な指標が決まるまで最大被害を推定することが困難なことを示した。また，②について，広域土砂災害に用いる調査技術の特徴に関して比較・整理した事例がほとんど報告されていないことから，広域土砂災害の代表的事例である平成 23 年東日本大震災，紀伊半島大水害の調査技術の活用に関する実態把握として文献調査を実施し（林ら，2017a），その結果から，人工衛星 SAR を用いた調査について，調査の時間短縮及び精度向上を図ることが有効であることを示した。

上記を踏まえ，①に関する検討として，最大被害を推定する指標の作成について検討を行った（第 3 章）。また，②に関する人工衛星 SAR を用いた調査技術に関する検討として，相関係数差分解析及び NDPI 差分解析の二つの崩壊地抽出手法について適用性の確認（第 4 章），高分解能人工衛星 SAR 画像の標準的な判読手法の確立・高分解能 SAR 画像の撮影条件について検討（第 5 章）を行った。これらについて，前章までに得られた結果について以下に示す。

第 3 章では，最大被害を推定する指標の作成に関する検討として，まず，土砂災害が多様な土砂移動現象の形態をとるという特徴を有すること，対象とする範囲によって被害の大きさが異なること，保全対象との位置関係等の土砂移動の発生位置に被害の大きさが依存すること，の指標化に係る三つの課題を示した。これらの課題に対して，土砂移動の規模を示す指標として「土砂移動マグニチュード」を横軸に，人的・物的被害を示す指標として「被害レベル」を縦軸に組み合わせ，両指標の組み合わせを 5 段階のカテゴリー（Ⅰ～Ⅴ）に区分して土砂災害の規模を評価する手法「土砂災害スケール」を提案した（Hayashi *et al.*, 2015）。過去の日本・アジア地域での災害事例について，本研究で提案す

る手法の妥当性を確認したところ，評価結果に特定の偏りが見られず，土砂移動現象の形態・対象とする範囲に依らず土砂災害の規模を評価可能であること，土砂移動の発生位置に偏らずに評価が行えることが示され，手法の妥当性が確認された。また，土砂災害スケールの区分毎の土砂災害の特徴に着目することにより，カテゴリーⅢ以上に分類される災害が広域土砂災害に特徴的な土砂移動形態を有していることを明らかにし，定量的に広域土砂災害を区分可能な手法を提案することができた。

第 4 章では，人工衛星 SAR を用いた崩壊地抽出に関する検討として，ALOS（だいち）の PALSAR 画像を用いて，平成 20 年岩手宮城内陸地震（以下，岩手宮城内陸地震），及び，平成 21 年山口県防府市での土石流災害（以下，山口災害）を対象に，広域に対して即時性を有する解析手法と考えられる，相関係数差分解析及び NDPI 差分解析の二つの崩壊地抽出手法について適用性の確認を行った（林ら，2012b）。適用性を評価するため抽出結果について，実際の崩壊地との比較による抽出精度・抽出限界崩壊地規模の評価，画像全体での広域での抽出精度の評価，斜面勾配の影響の評価，斜面の傾斜方向の影響の評価を実施した。また，甚大な被害を引き起こすと考えられる面積 10,000m^2 以上の崩壊地を抽出可能であるかについても評価を行った。以下に得られた結果を示す。

・両解析手法ともに，ほぼ同程度の抽出精度を有しており，航空写真判読結果から得られた崩壊地を正とした場合の認識率は，面積 10,000m^2 以上の崩壊地で 60～80%程度（誤認識率 20～40%程度）であり，面積 40,000m^2 以上の崩壊地で 80%程度～100%（誤認識率 0～20%程度）であった。一方，過抽出の影響を評価するため，SAR 画像解析による抽出結果の崩壊地認識率を正は，面積 10,000m^2 以上の崩壊地で 20～40％程度（誤認識率 60～80%程度）であり，面積 40,000m^2 以上の崩壊地で 40～80％程度（誤認識率 20～60%程度）であった。抽出限界崩壊地規模については，岩手宮城内陸地震では 3×3 メッシュ相当（面積 900m^2）未満，山口災害では 5×5（面積 2,500m^2）メッシュ相当と推測された。

・画像全体の広域での抽出精度の評価では，定性的ではあるが，岩手宮城内陸地震での抽出結果が山口災害での抽出結果に比して，精度良く崩壊地が抽出できている。

・斜面勾配の影響については，崩壊地面積の規模による影響が斜面勾配の影響より，抽出結果に大きく影響を与えており，斜面の傾斜方向の影響については，崩壊地面積が小さくなるに従って，衛星からの傾斜方向が遠ざかるにつれて，抽出精度が低下している傾向が見て取れた。

・両解析手法により、人工衛星 SAR 画像 1 シーンの約 300km^2 の範囲を悪天候時・夜間に関わらず 11.5 時間程度で調査可能となり，調査の時間短縮及び客観性・再現性を高め、精度向上を図れるという成果を得た。

第 5 章では，人工衛星 SAR を用いた崩壊地判読に関する検討として，紀伊半島大水害時に発生した河道閉塞箇所を対象として，高分解能人工衛星 SAR 画像判読の客観性・再現性を高めるための標準的な判読手法の確立，画像の撮影条件について検討を行った（林ら，2013）。まず，紀伊半島大水害の災害対応に従事した判読技術者にヒアリングを実施し，実際の判読手順に沿い，湛水池・崩壊地といった河道閉塞の地形的特徴を判断項目とする，標準的な判読基準となるチェックリストを作成した。また、チェックリストを用いて，現在運用中の高分解能 SAR 衛星の画像（TerraSAR-X、COSMO-SkyMed，RADARSAT-2）に対し，河道閉塞箇所の視認性の判断を行った。以下に得られた結果を示す。

・人工衛星からのレーダー照射方向（東向き・西向き）によらず，SAR 画像内の河道閉塞箇所のうち 50～70%を抽出できた。

・画像取得時の入射角は，概ね 35°～50°程度が望ましい。画像の分解能は，3m 以下であることが望ましい。

・高分解能 SAR 衛星 TerraSAR-X のみならず， COSMO-SkyMed，RADARSAT-2

の画像においても，河道閉塞箇所の抽出は可能であることが明らかとなった。

・上記の衛星が活用可能な条件を示すことにより，調査可能な人工衛星は 6 機となり，調査頻度は 6 倍程度に増えることから，調査の時間短縮及び精度向上を図る成果を得た。

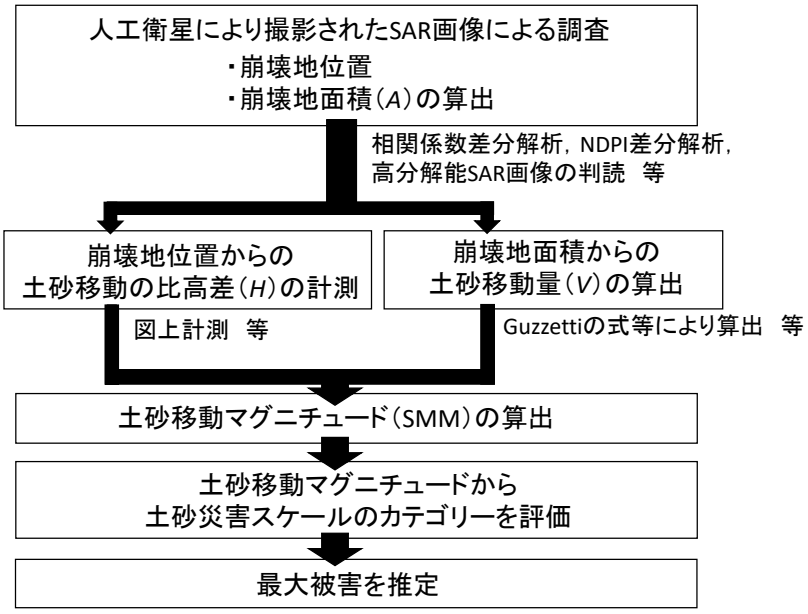
6.2　人工衛星 SAR を用いた崩壊地抽出・判読手法と最大被害を推定する指標を組み合わせた初動時被害状況把握手法の提案と適用性の評価

本項では，人工衛星 SAR を用いた崩壊地抽出・判読に関する検討結果（第 4, 5 章の検討結果）と最大被害を推定する指標（第 3 章の検討結果）を組み合わせ，広域土砂災害の被害状況把握における課題である①及び②を解決し，調査時間を短縮し最大被害を推定する手法の提案と適用性の評価を行う（林ら，2017b）。

6.2.1　人工衛星 SAR を用いた崩壊地抽出・判読手法と最大被害を推定する指標を組み合わせた初動時被害状況把握手法の提案

人工衛星 SAR を用いた崩壊地抽出・判読に関する検討結果と最大被害を推定する指標を組み合わせ，人工衛星 SAR を用いた崩壊地抽出・判読の結果から最大被害を推定する手法（以下，提案手法）のフローを図－6.1 に示す。提案手法では，人工衛星 SAR 画像を用いた崩壊地抽出・判読結果から崩壊地位置・崩壊地面積に関する情報を得た後，崩壊地位置から土砂移動の比高差の計測，崩壊地面積から土砂移動量の算出を行う。その後，土砂移動量・比高から土砂移動マグニチュード（SMM）を算出し，土砂移動マグニチュードから土砂災害スケールのカテゴリーを評価し，最大被害を推定する。

本研究では，比高差は，第 4 章で実施した岩手宮城内陸地震・山口災害に対する相関係数差分解析及び NDPI 差分解析の崩壊地抽出結果については簡便のため 100m とした。また，第 5 章で実施した紀伊半島大水害に対する高分解能人工衛星 SAR 画像の判読結果ついては，国土地理院 25000 分の 1 地形図から等高線の読み取りを行った。土砂移動量については，それぞれの崩壊地抽出結果から得られた崩壊地面積と土砂移動量の関係式であるグゼッティの式（Guzzetti, *et al.*, 2009）を用いて，土砂移動量を算出した。



図－6.1　人工衛星 SAR 画像を用いた調査から土砂災害規模を推定する手法のフロー

Fig. 6.1　The flow of estimation method for maximum damage by surveying with SAR artificial satellite imagery

6.2.3　検討結果と妥当性の評価

1)　最大被害の推定に関する結果と評価

岩手宮城内陸地震・山口災害に対する相関係数差分解析及び NDPI 差分解析の崩壊地抽出結果から提案手法により SMM を求めた結果を表－6.1 に示す。また，紀伊半島大水害に対する高分解能人工衛星 SAR 画像の判読結果から提案手法により SMM を求めた結果を表－6.2 に示す。第 3 章の図－3.2 において評価された災害実績に基づく SMM・土砂災害スケールのカテゴリーと提案手法により算出された SMM・土砂災害スケールのカテゴリーの比較を表－6.3 に示す。岩手宮城内陸地震については，災害実績の算出結果は移動土砂量が 7,000 万 m^3 の荒砥沢地すべりが SMM の上昇に大きく寄与しており，提案手法の算出結果は災害実績に比べ低くなっている。山口災害については災害実績と提案手法の SMM・カテゴリーに概ね一致が見られる。紀伊半島大水害については，カテゴリーが異なる結果となったが，判読範囲に熊野の深層崩壊（和歌山県田辺市）等が含まれていないこと（図－1.6）を考慮すれば，提案手法は概ね SMM・土砂災害スケールのカテゴリーを適切に予測できると言える。

表－6.1　相関係数差分解析・NDPI 解析の結果から求められる SMM

Table 6.1 SMM calculated by the result of the correlation coefficient difference analysis and the NDPI difference analysis

災害名	解析手法	崩壊地1箇所あたり面積（m^2）	崩壊地1箇所土砂移動量（m^3）	仮の比高差（m）	抽出数	SMM
岩手宮城内陸地震	相関係数差分解析	40,000	348,513	100	13	8.66
	NDPI解析	62,500	665,668	100	9	8.78
山口災害	相関係数差分解析	40,000	348,513	100	26	8.96
	NDPI解析	40,000	348,513	100	24	8.92

表－6.2　高分解能 SAR 画像の判読結果から求められる SMM

Table 6.2 SMM calculated by the result of interpretation of SAR imagery

箇所名	面積（ha）	土砂移動量（m^3）	比高差（m）	SMM
坪内①	2.0	127,563	180	7.36
坪内②	11.8	1,672,864	180	8.48
坪内③	5.2	509,843	200	8.01
宇井	8.7	1,075,312	230	8.39
長殿	19.5	3,465,628	440	9.18
赤谷	28.2	5,916,882	570	9.53
栗平	33.7	7,661,170	330	9.40
三越	6.3	673,404	180	8.08
全箇所				9.91

表－6.3 災害実績と提案手法の SMM・土砂災害スケールのカテゴリーの比較

Table 6.3 Comparison of SMM and SDS category calculated by disaster records and proposed method

災害名	解析手法	災害実績		提案手法	
		SMM	カテゴリー	SMM	カテゴリー
岩手宮城内陸地震	相関係数差分解析	10.37	Ⅴ	8.66	Ⅳ
	NDPI解析			8.78	Ⅳ
山口災害	相関係数差分解析	8.48	Ⅳ	8.96	Ⅳ
	NDPI解析			8.92	Ⅳ
紀伊半島大水害	判読	10.46	Ⅴ	9.91	Ⅳ

2) 調査時間の短縮及び精度向上に関する評価

提案手法を用いることにより，人工衛星 SAR 画像を用いた崩壊地抽出結果が得られた時点でほぼ即時的に，最大被害の推定は可能となる。

6.1 に示したとおり，第 4 章で実施した岩手宮城内陸地震・山口災害に対する相関係数差分解析及び NDPI 差分解析については，人工衛星 SAR 画像 1 シーンの約 300km^2 の範囲を悪天候時・夜間に関わらず 11.5 時間程度で調査可能であることから，表－1.3 に示した 1 日あたりの調査面積を考えた場合，約 630km^2 となり，土砂災害危険箇所の緊急点検とほぼ同じ 1 日あたりの調査面積となるが，土砂災害危険箇所の緊急点検は豪雨時・夜間は実施できないため，提案手法の方が有利であると考えられた。また，第 5 章で実施した紀伊半島大水害に対する高分解能人工衛星 SAR 画像の判読については，1 日あたりの調査面積は 1,200km^2（表－1.3）となる。加えて，第 5 章での検討結果より，調査の頻度は 6 倍程度に増える。調査の精度向上については 6.1 にまとめたとおりである。

3) まとめ

本項における検討結果から，広域土砂災害の被害状況把握に係る①最大被害を推定する指標の作成，②河道閉塞や土石流の発生実態調査の時間短縮及び精度向上の二つの課題を解決するとともに，人工衛星 SAR を用いた崩壊地抽出・判読手法と最大被害を推定する指標「土砂災害スケール」を組み合わせることにより，広域土砂災害に対し，短時間に最大被害を推定する被害状況把握手法を示した。

6.3 今後の研究課題

6.3.1 最大被害の推定する指標の作成に関する課題

第 3 章で実施した最大被害を推定する指標の作成に関する検討については，今後も国内外の長期間の災害データの収集・分析を行い，精度向上が図られることが有効であると考えられる。

6.3.2 人工衛星 SAR 画像を用いた調査時間の短縮及び精度向上に関する課題

本研究においては，平成 26 年度に打ち上げられた JAXA の ALOS-2（日本，L

バンド）の活用については検討ができていない。今後 ALOS-2 を検討に加え，さらなる実務での活用の検討を行っていくことが望ましいと考えられる。

1) 調査時間の短縮に関する課題

本研究においては，人工衛星の周期・回帰日数・位置に影響をうける撮影頻度，衛星運用者・画像入手先の体制等により，衛星ごとに撮影の依頼から画像入手までの時間の長短が異なること（例えば，水野ら，2013）については議論ができておらず，今後検討が必要である。

2) 精度向上に関する課題

第 4，5 章で実施した人工衛星 SAR 画像を用いた調査に関する検討については，人工衛星 SAR 画像を用いた崩壊地抽出・判読技術は開発途上であり，今後も技術開発の継続が必要である。例えば，第 4 章で実施した岩手宮城内陸地震・山口災害に対する相関係数差分解析及び NDPI 差分解析では，6.2 での提案手法の検討において，岩手宮城内陸地震における荒砥沢地すべりのような大規模崩壊の発生により，崩壊地面積を過小に算出するという課題が生じた。

6.3.3 提案手法に関する課題

6.2.1 で実施した提案手法に関する検討は，限られた災害事例を対象にしたものであるが，本研究により，人工衛星 SAR を用いた崩壊地抽出・判読の結果から最大被害を推定する手法の実利用の可能性を示せたものと考えている。今後，より多くの災害事例においてさらなる検証が必要であると考えられる。

実際の災害対応を念頭においた場合，例えば，1 台の PC 上において提案手法の一連の流れ（図－6.1）を作業可能な環境が整備されることが望ましい。

第 7 章　結論

我が国では近年，広域土砂災害による甚大な被害が生じており，今後も発生が懸念されている。広域土砂災害に対する災害対応においては，崩壊による河道閉塞や土石流の発生実態・被害状況把握の遅れが，国土交通省による土砂災害防止法の緊急調査，TEC-FORCE 等の制度・運用の支障の一つとなっており，①最大被害を推定する指標の作成，②河道閉塞や土石流の発生実態調査の時間短縮及び精度向上の二つが大きな課題となっている。

本研究は，広域土砂災害の被害状況把握に係る上記の二つの課題を解決する調査時間を短縮し最大被害を推定する手法を提示することを目的とした。

第 1 章において，広域土砂災害の対応事例の調査から，①②の課題を示し，①については，既往の対応事例においては，死者・行方不明者，崩壊土砂量等の個別の災害に特徴的な指標を過去の災害事例と比較することにより評価が行われており，被害状況の把握が進み特徴的な指標が決まるまで，最大被害を推定することが困難であるという課題があることを明らかにし，この課題の解決のため，災害の現象的特徴に依存せず比較可能な指標の作成が最大被害の推定に必要であると考えられた。また，②については，ヘリコプター，人工衛星等の複数の調査技術の調査可能な面積・悪天候時と夜間の調査の可否・調査対象等の特徴について比較・整理した事例はほとんど報告されておらず，対応事例の調査から人工衛星 SAR について，河道閉塞や土石流の発生実態調査の時間短縮及び客観性・再現性の高い調査手法を検討し精度向上を図ることが，広域土砂災害の被害状況把握において有効であると考えられた。

第 2 章においては，研究方法を示した。

第 3 章において，①に関する検討として，最大被害を推定する指標の作成について検討を行い，土砂移動の規模を示す指標として「土砂移動マグニチュード」を横軸に，人的・物的被害を示す指標として「被害レベル」を縦軸に組み合わせ，両指標の組み合わせを 5 段階のカテゴリー（Ⅰ～Ⅴ）に区分して土砂災害の規模を評価する手法「土砂災害スケール」を提案した。

第 4，5 章においては，人工衛星 SAR を用いた調査技術に関する検討を行った。第 4 章では，日本の陸域観測衛星 ALOS（だいち）の SAR 画像を用いて，平成 20 年岩手宮城内陸地震（以下、岩手宮城内陸地震）及び平成 21 年山口県

防府市での土石流災害（以下、山口災害）を対象に，広域を短時間に調査可能であると考えられた相関係数差分解析及び NDPI 差分解析の二つの崩壊地抽出手法について適用性の確認を行い，悪天候時・夜間に関わらず調査可能であり，調査の時間短縮及び客観性・再現性を高め、精度向上を図れる手法であることを確認した。第 5 章では，平成 23 年紀伊半島大水害の際に河道閉塞箇所の発見した高分解能人工衛星 SAR 画像の判読について、今後の災害対応での活用のため，判読の客観性・再現性を高めるための標準的な判読手法の確立，画像の撮影条件について検討を行い，衛星が活用可能な撮影条件を示し，人工衛星 6 機による調査が可能となり，調査頻度は 6 倍程度に増えるという調査の時間短縮及び精度向上を図る成果を得た。

最後に，第 6 章において，①，②に関して検討を行った手法を組み合わせ，人工衛星 SAR を用いた調査によって得られた崩壊地位置・面積の情報から，土砂移動の比高・土砂移動量を推定し，その結果から土砂移動マグニチュードを算出し，最大被害の推定する手法（提案手法）を示した。さらに，岩手宮城内陸地震，山口災害，紀伊半島大水害の災害実績と提案手法により算出された土砂移動マグニチュードの比較を行い，提案手法の妥当性を確認した。また，調査時間の観点からも，従来の調査技術との比較の結果，提案手法は有利であることを確認した。

以上の結果より，本研究では，広域土砂災害の被害状況把握に係る①最大被害を推定する指標の作成，②河道閉塞や土石流の発生実態調査の時間短縮及び精度向上の二つの課題を解決するとともに，それらの研究結果から，人工衛星 SAR を用いた崩壊地抽出・判読手法と最大被害を推定する指標「土砂災害スケール」を組み合わせることにより，広域土砂災害に対し，短時間に最大被害を推定する被害状況把握手法を示した。

本研究の成果の活用については，第 3 章の成果は，台風委員会の水文部門のプロジェクトである「土砂関連災害の社会経済へのインパクト評価」において，日本の災害報告の仕組みとともに普及が図られている（加本，2015）。第 4，5 章の成果は，紀伊半島大水害後，円滑な土砂災害防止法の緊急調査及び TEC-FORCE による地域支援のために，整備が進められている土砂災害発生状況

をセンサーによって把握する技術（国土交通省砂防部・気象庁，2012）の一部として，土砂移動によって発生した振動をセンサーでとらえ発生位置を推定する技術，水位・流量等の流域内の水文情報を把握する技術とともに，衛星による土砂災害発生箇所の調査のための衛星画像判読の部分において活用が行われており，実際の災害対応に活用されている。具体的には，第 4 章の成果の一部である NDPI 差分解析については，NDPI 差分解析の結果を衛星画像判読者の支援の材料とするため，支援システムに組み込む取組が行われている（鵜殿ら，2016）。また，第 5 章の成果である，高分解能 SAR 画像の撮影条件，衛星画像判読のためのチェックリストについては，土砂災害発生箇所の調査のための衛星画像判読の標準的な手法として，災害対応の実践的な手引き「単偏波の高分解能 SAR 画像による河道閉塞箇所判読調査手法（案）」（水野ら，2013）にとりまとめられ，公表されている。

本研究の成果が，今後の土砂災害対策において，広域土砂災害の初動時被害状況の把握，土砂災害の危機管理に関する人的資源・資機材の配分の改善に繋がり，災害対応の一助となれば幸いである。

謝辞

北海道大学農学研究院　山田孝教授，丸谷知己特任教授，笠井美青准教授には，本論文をとりまとめる貴重な機会を筆者に与えて下さるとともに，全般にわたり懇切丁寧なご指導を賜りました。

北海道大学農学研究院　小山内信智特任教授，桂真也助教，ならびに，国土交通省国土技術政策総合研究所　岡本敦土砂災害研究部長，内田太郎主任研究官には，筆者が研究に着手した国土技術政策総合研究所砂防研究室時代から，長年に渡り研究のご指導を頂きました。

本論文の第 3 章にある最大被害を推定する指標の作成に関する研究については，韓国山林科学院　Lee Chang-Woo 氏，Woo Choongshik 氏には，貴重な災害記録の提供を頂きました。また，指標の算出に際しては，アジア航測株式会社の皆様には災害記録の分析をはじめ多くの技術的なご支援，ご助言を頂きました。

本論文の第 4 章，第 5 章にある人工衛星 SAR を用いた崩壊地抽出・判読手法に関する研究については，国土技術総合政策総合研究所砂防研究室時代の同僚である，国立研究開発法人土木研究所　水野正樹上席研究員，国際航業株式会社　佐藤匠氏，国土技術政策総合研究所　神山嬢子主任研究官，一般財団法人リモートセンシング技術センター　清水孝一氏，一般財団法人砂防フロンティア整備推進機構　西真佐人氏，大日本コンサルタント株式会社　吉川知弘氏の皆様には，各研究段階に応じた適切なご助言を頂きました。また，衛星画像の解析・判読に際しては，日本工営株式会社，株式会社パスコの皆様には数多くの技術的なご支援，ご助言を頂きました。

一般財団法人砂防・地すべり技術センター　南哲行理事長，国土技術政策総合研究所　野呂智之土砂災害研究室長，筆者が所属します北海道大学農学研究院国土保全学研究室の寄附元である一般財団法人砂防・地すべり技術センターの皆様，また，国土交通省砂防部の皆様からは，日常的に暖かいご支援を頂きました。

これらお世話になった皆様に心から感謝申し上げます。

引用文献

CAO Yun-ganga, YAN Li-juanb, ZHENG Zezhonga (2008)：Extraction of information on geology hazard from multi-polarization SAR images, XXIst International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Congress, XXXVII-B4, p. 1529-1532

土木研究所（2012）：過去の深層崩壊事例について（～平成 22 年度），https://www.pwri.go.jp/team/volcano/tech_info/study/h23_fy2011/past_dscl-list20120117.pdf，参照 2017-06-20

Evans, S.G., Guthrie, R.H., Roberts, N.J., and Bishop, N.F. (2007): The disastrous 17 February 2006 rockslide-debris avalanche on Leyte Island, Philippines: a catastrophic landslide in tropical mountain terrain, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., Vol. 7, p. 89-101

古川浩平・海堀正博・久保田哲也・地頭薗隆・権田豊・杉原成満・林真一郎・池田暁彦・荒木義則・柏原佳明（2009）：2009 年 7 月 21 日山口県防府市での土砂災害緊急調査報告，砂防学会誌，Vol. 62，No. 3，p. 62-73

Christopher Gomez and Heather Purdie (2016): UAV - based photogrammetry and geocomputing for hazards and disaster risk monitoring - a review, Geoenvironmental Disasters, 3:23

Guzzetti, F., Ardizzone, F., Cardinali, M., Rossi M. and Valigi, D. (2009): Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy, Earth Planet. Sci. Lett., Vol. 279, p. 222-229

林真智・豊山孝子・斉藤和也・清水孝一・山越隆雄（2000）：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第 29 回学術講演会論文集, p. 73-74

林拙郎・土屋智・近藤観慈・芝野博文・沼本晋也・小杉賢一朗・山越隆雄・池田暁彦（2004）：2004 年 9 月 29 日,台風 21 号に伴って発生した三重県宮川村の土砂災害(速報)，砂防学会誌，Vol. 57, No. 4, p. 48-55

林真一郎・岡本敦・水野正樹・佐藤匠・山越隆雄・中野陽子・横田浩・野田敦夫・吉川和男（2012a）：高分解能 SAR 衛星画像を用いた台風 12 号災害での河道閉塞箇所の推定，平成 24 年度砂防学会研究発表会概要集，No.66，p. 186-187

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

（2012b）：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 Vol.65，No.4，p. 3-14

林真一郎・水野正樹・佐藤匠・神山嬢子・岡本敦・吉川知弘・鵜殿俊昭・横田浩・野田敦夫・吉川和男（2013）：紀伊半島台風 12 号災害を事例とした人工衛星高分解能 SAR 画像の判読による河道閉塞箇所探索手法の確立，砂防学会誌 Vol.66, No.3, p. 32-39

林真一郎・清水孝一・小山内信智・中田慎・松田昌之・小川紀一朗（2010）：山口県防府市で発生した土砂災害の規模に関する考察，平成 22 年度砂防学会研究発表会概要集，p. 266-267

林真一郎・内田太郎・桂真也・笠井美青・小山内信智・丸谷知己（2017a）：被害が広域に及ぶ大規模な土砂災害に対する初動時被害状況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，Vol. 54，No.2，p. 18-25

林真一郎・桂真也・笠井美青・小山内信智・丸谷知己・野呂智之・神山嬢子（2017b）：SAR 画像を用いた被害状況調査から土砂災害規模を推定する手法の検討，平成 29 年度砂防学会研究発表会概要集，p. 548-549

Shin-ichiro HAYASHI, Taro UCHIDA, Atsushi OKAMOTO, Nobutomo OSANAI, Chang-Woo LEE, Choongshik WOO (2015) : Estimation of the socio-Economic impacts of sediment disasters by using evaluation indexes of the magnitude of sediment movement and level of damage to society, International Journal of Erosion Control Engineering Vol. 8, No. 1, p. 1-10

平松晋也・水野秀明・池田暁彦・加藤誠章（2006）：2006 年 7 月豪雨による土砂災害―長野県岡谷市で発生した土石流災害―，砂防学会誌，Vol. 59，No. 3，p. 51-56

日浦啓全・笹原克夫（2005）：四国地方で発生した土砂災害，第 37 回砂防学会シンポジウム講演集，p. 25-40

Hübl J., Kienholz, H. and Loipersberger, A. (2002): DOMODIS –Documentation of Mountain Disasters, Internationale Forschungsgesellschaft INTERPRAEVENT Schriftenreihe 1, Handbuch 1, 36 pp.

Iverson, R.M. (1997): The physics of debris flows, Reviews of Geophysics, Vol. 35, p. 245-296

地盤工学会（2010）：平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震災害調査報告書，159 pp.
加本実（2015）：近年の台風委員会の（Typhoon Committee）の活動，水文・水資源学会誌，Vol. 28，No.3，p. 121-136
木下篤彦・神野忠弘・江川佳苗・島田徹・林栄明・笠原拓造（2012）：紀伊半島大水害で発生した河道閉塞における航空レーザ計測データを活用した土砂移動実態把握，平成 24 年度砂防学会研究発表会概要集，No.66，p. 596-597
木下篤彦・島田徹・笠原拓造・林栄明・名草一成・小川内良人・村木広和（2013）：回転翼型マイクロ UAV を用いた深層崩壊箇所の災害調査，砂防学会誌，Vol. 66，No. 3，p. 51-54
小荒井衛・佐藤浩・新井場公徳・小山内信智・伊藤英之（2008）：リモートセンシングで捉えたレイテ島岩屑なだれの地形的特徴，日本地すべり学会誌，Vol.45，No.2，p. 106-117
小嶋伸一・小山内信智・西本晴男・小川紀一朗・松田昌之（2009）：土砂災害の被害イメージのアンケート調査による被害指標の検討，砂防学会誌，Vol. 62，No. 3，p. 47-54
国土地理院（2016）：航空レーザ測量，http://www.gsi.go.jp/kankyochiri/Laser_index.html，参照 2016-09-19
国土技術政策総合研究所・土木研究所（2003）：平成 15 年 7 月 18 日から 20 日にかけて発生した梅雨前線豪雨による土砂災害（速報），http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/saigai/h15dosha/minamata_dazaifu.pdf，参照 2016-10-24
国土技術政策総合研究所・土木研究所（2011）:平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋地震土木施設災害調査報告，国土技術政策総合研究所資料 646 号・土木研究所資料 4202 号，486 pp.
国土技術政策総合研究所・土木研究所（2013）:平成 23 年（2011 年）紀伊半島台風 12 号土砂災害調査報告，国土技術政策総合研究所資料 728 号・土木研究所資料 4260 号，213 pp.
国土交通省（2011a）：今後の土砂災害対策を考える会第 1 回（平成 23 年 4 月 12 日）配布資料　資料 2 今後の土砂災害対策の進め方，

http://www.mlit.go.jp/river/sabo/kongo_dosyasaigai/01/110412_shiryo2.pdf , 参照 2016-05-04

国土交通省（2011b）：今後の土砂災害対策を考える会第２回（平成 23 年 6 月 1 日）配布資料　資料４－２東日本大震災を踏まえた今後の土砂災害対策のあり方（案），http://www.mlit.go.jp/river/sabo/kongo_dosyasaigai/02/110601_shiryo4-2.pdf, 参照 2017-01-11

国土交通省（2011c）：今後の土砂災害対策を考える会第２回（平成 23 年 6 月 1 日）配布資料　資料４－１東日本大震災における土砂災害対策への対応について, http://www.mlit.go.jp/river/sabo/kongo_dosyasaigai/02/110601_shiryo4-1.pdf, 参照 2016-05-04

国土交通省（2012）：災害・防災情報　平成２３年台風第１２号及び１５号による被害状況等 53 報，http://www.mlit.go.jp/saigai/saigai_110901.html，参照 2016-09-13

国土交通省（2016）：災害・防災情報　東日本大震災災害情報 1 報～130 報, http://www.mlit.go.jp/saigai/saigai_110311.html, 参照 2016-09-13

国土交通省中国地方整備局（2009）：平成 21 年 7 月 28 日記者発表 中国地方整備局の TEC-FORCE 隊員による土砂災害危険箇所等の緊急点検の結果（平成 21 年 7 月 28 日現在）をお知らせします。，https://www.cgr.mlit.go.jp/saigai/saigai02/pdf/2009/2009072818520962.pdf , 参照 2013-07-23

国土交通省北陸地方整備局（2016）：ほくりく号の概要，http://www.hrr.mlit.go.jp/bosai/hgo/，参照 2016-05-16

国土交通省関東地方整備局（2013）：防災ヘリコプター維持管理・運営事業業務要求水準書，http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000084202.pdf，参照 2016-09-13

国土交通省近畿地方整備局紀伊半島大水害記録誌事務局（2014）: 2011 年紀伊半島大水害　国土交通省近畿地方整備局災害対応の記録，199 pp.

国土交通省航空局（2016）：無人航空機（ドローン，ラジコン機等）の安全な飛行のためのガイドライン，http://www.mlit.go.jp/common/001128047.pdf，参照

2016-09-21
国土交通省水管理・国土保全局（2016）：TEC-FORCE（緊急災害対策派遣隊）について，http://www.mlit.go.jp/saigai/TEC-FORCE.PDF，参照 2016-05-23
国土交通省南海トラフ巨大地震・首都直下地震対策本部（2014a）：首都直下地震対策計画，49 pp.
国土交通省南海トラフ巨大地震・首都直下地震対策本部（2014b）：南海トラフ巨大地震対策計画，44 pp.
国土交通省砂防部（2008a）：大規模土砂災害危機管理計画，8 pp.
国土交通省砂防部（2008b）：平成 20 年 6 月 20 日記者発表　土砂災害危険箇所点検緊急支援チームの活動結果（報告）「平成 20 年岩手・宮城内陸地震による被災地域の土砂災害危険箇所等の緊急点検結果について」，http://www.thr.mlit.go.jp/bumon/kisya/kisyah/images/19471_1.pdf, 参照 2013-07-23
国土交通省砂防部（2011a）：平成 23 年に発生した土砂災害，http://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h23dosha/h23doshasaigai_gaiyo.pdf，参照 2016-09-13
国土交通省砂防部（2011b）：東北地方太平洋沖地震等に伴う土砂災害危険箇所の緊急点検結果について，http://www.mlit.go.jp/common/000146556.pdf，参照 2016-08-08
国土交通省砂防部（2011c）：台風１２号に伴う豪雨による奈良県・和歌山県・三重県での崩壊土砂量について（速報値），http://www.mlit.go.jp/common/000168726.pdf，参照 2016-09-17
国土交通省砂防部（2011d）：平成 23 年 9 月 13 日記者発表　台風 12 号豪雨に伴う河道閉塞箇所数について，http://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo03_hh_000402.html, 参照 2016-09-28
国土交通省砂防部保全課（2014）：過去に発生した降雨に伴う大規模な土砂災害について，http://www.mlit.go.jp/river/sabo/H26_hiroshima/140829kakonojirei.pdf, 参照 2016-10-04
国土交通省砂防部・気象庁(2012)：土砂災害への警戒の呼びかけに関する検討会第 2 回（平成 24 年 10 月 31 日）当日配布資料　資料 4　土砂災害発生状況をセンサーによって把握する技術，

http://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/dosya/24part2/24-2-shiryo4.pdf ， 参 照 2016-07-11

国土交通省砂防部砂防計画課（2008）：平成２０年岩手・宮城内陸地震により発生した河道閉塞（天然ダム）箇所について，http://www.mlit.go.jp/report/press/river03_hh_000052.html，参照 2016-10-26

葛岡成樹・水野敏実（2004）: 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 巻，第 2 号，p. 140-152

Larsen, I.J., Montgomery, D.R., and Korup, O. (2010): Landslide erosion controlled by hillslope material, Nature Geoscience, Vol. 3, p. 247-251

Lateltin, O., Haemmig, C., Raetzo, H., and Bonnard, C. (2005): Landslide risk management in Switzerland, Landslides, Vol. 2, p. 313-320

O Marc, N Hovius, P Meunier, T Uchida, S Hayashi (2015) : Transient changes of landslide rates after earthquakes, Geology V.43 No.10, p. 883-886

Matsuoka, M. and Yamazaki, F. (2004) : Use of satellite SAR intensity imagery for detecting building areas damaged due to earthquakes, Earthquake Spectra, Vol. 20, No.3, p. 975-994

南哲行・小山内信智（2014）：現代砂防学概論，古今書院，184 pp.

三浦弘之・弓真由子（2015）：非線形写像法による航空レーザ測量データの幾何補正とそれに基づく 2014 年広島豪雨災害での崩壊土砂量の推定，地域安全学会論文集，No. 27，p. 283-291

宮城県（2008）：平成 20 年岩手・宮城内陸地震に係る土砂災害技術検討委員会検討結果，101 pp.

宮崎県（2005）：平成 17（2005）年 9 月 4～7 日台風 14 号による災害，http://www.pref.miyazaki.lg.jp/sabo/kurashi/bosai/4-28.html，参照 2016-10-24

水野正樹・神山嬢子・江川真史・佐藤匠・蒲原潤一・林真一郎（2013）：単偏波の高分解能 SAR 画像による河道閉塞箇所判読調査手法（案），国総研資料 760 号，30 pp.

Mizuno M., Sato T., Hayashi S., Nishi M., Katsura S., Nakagawa K.(2011) : Investigation of landslides caused by the 2011 Tohoku Earthquake using optical satellite images, International Journal of Erosion Control Engineering Vol.4, No.2, p.

48-56
門間敬一 ・千田容嗣 ・海老原和重（1999）: がけ崩れ災害の実態，土木研究所資料，No. 3651, 180 pp.
森山裕二・岡本敦・水野正樹・内田太郎・林真一郎・石塚忠範（2011）: 2011 年台風 12 号による紀伊半島における土砂災害の速報，土木技術資料，Vol. 53, No.12，p. 4-7
森脇寛・佐藤照子・千葉長 (1998) : 1997 年 7 月鹿児島県出水市針原川土石流災害調査報告, 防災科学技術研究所主要災害調査，No.35，69 pp.
長野県（2015）: 長野県の砂防，46 pp.
中野陽子・清水武志・山越隆雄・石塚忠範・島田政信・浦塚清峰・柴山卓史（2011）: 火山緊急減災の為の衛星及び航空機を用いた DEM データの作成技術とその特性，平成 23 年度砂防学会研究発表会概要，p. 476-477
日本リモートセンシング学会（2011）: 基礎からわかるリモートセンシング，理工図書株式会社，319 pp.
西真佐人・小山内信智・桂真也・田村圭司・山越隆雄・内田太郎・武澤永純・清水武志（2009）: 平成 21 年 7 月中国・九州北部豪雨による山口県防府市の土砂災害，土木技術資料，Vol. 52，No.9，p. 6-7
Nishiguchi, Y., Uchida, T., Takezawa, N., Ishizuka, T.,. and Mizuyama, T. (2012): Runout characteristics and grain size distribution of large-scale debris flows triggered by deep catastrophic landslides, International Journal of Erosion Control Engineering, Vol. 5, p. 16-26
野呂智之・水野秀明・内田太郎・山越隆雄・西本晴男・藤澤和範・田中秀基・秋山一弥・小嶋伸一（2004）: 平成 16 年 7，8 月新潟,福井および徳島における土砂災害(速報)，砂防学会誌，Vol. 57，No. 3，p. 47-52
小山内信智・笠井美青・林真一郎・桂真也・古市剛久・伊倉万理・高坂宗昭・藤浪武史・水垣滋・阿部孝章・布川雅典・吉井厚志・紅葉克也・渡邊康玄・塩野康浩・宮崎知与・澤田雅代・早川智也・松岡暁・佐伯哲朗・稲葉千秋・永田直己・松岡直基・井上涼子（2017a）: 平成 28 年台風 10 号豪雨により北海道十勝地方で発生した土砂流出，砂防学会誌，Vol.69，No.6，p. 80-91
小山内信智・林真一郎・古市剛久・藤浪武史・阿部孝章・田中忠彦・吉川契太

郎・一法師隆充・巖倉啓子・早川智也・松岡暁・永野統宏・齋藤篤司・大島千和（2017b）：平成 28 年 8 月北海道上川町（層雲峡）で発生した土石流の実態，砂防学会誌，Vol.69，No.5，p. 47-57

小山内信智，高原晃宙，井上公夫，宅見唯明，小川洋（2014）：南海トラフ巨大地震による土砂災害の発生に関する一考察，平成 26 年度砂防学会研究発表概要集Ｂ，p. 320-321

砂防学会東北地方太平洋沖地震災害調査委員会（2013）：砂防学会砂防学会東北地方太平洋沖地震災害調査委員会報告書，203 pp.

砂防・地すべり技術センター（2005）：平成 16 年土砂災害の実態，56 pp.

Saito. H, O.Korup, T.Uchida, S.Hayashi, T.Oguchi (2004) : Rainfall conditions, typhoon frequency, and contemporary landslide erosion in Japan, Geology V.42, No.11, p. 999-1002

Sidle, R. C., and Ochiai H. (2006): Landslides: Processes, Prediction, and Land Use, Water Resour. Monogr. Ser., Vol. 18, 312 pp., AGU, Washington, D. C., doi:10.1029/WM018.

下村博之・朝比奈利廣・鵜殿俊昭・横田浩・鈴木崇・野田敦夫（2008）：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，Vol. 61， No. 2， p. 68-69

Suzuki, T., Shibayama, T., and Udono T. (2008): High resolution SAR images of landslides triggered by Sichan and Iwate-Miyagi earthquake, The First World Landslide Forum

田畑茂清・水山高久・井上公夫（2002）：天然ダムと災害，古今書院，205 pp.

高岸且（2010）：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，ヒマラヤ氷河・氷河湖研究会

武士俊也・水野正樹（2012）：地震による地すべり発生箇所予測と衛星による広域崩壊地調査，平成 24 年 3 月 13（東京会場）「国総研・土研東日本大震災報告会～震災から一年経て，見えてきたこと」，http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/saigai/h23tohoku/houkoku2/happyou/10.pdf，参照 2016-09-14

飛田幹男・今給黎哲郎・水藤尚・加藤敏・林文・村上亮（2006）：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，109 号，p. 21-32
飛田幹男・村上亮・中川弘之・矢来博司・藤原智（2001）: SAR 画像のマッチングによる有珠山周辺の面的な三次元地殻変動,変動速度,体積変化，国土地理院時報，95 号，p. 37-48
土屋智・古賀省三・笹原克夫・松井宗廣・中広三男・渡部文人・嶋大尚・吉田和久（2004）: インドネシア南スラウェシ州で発生した巨大崩壊と崩壊土砂の流出堆積（速報），砂防学会誌，Vol. 57，No. 3，p. 40-46
内田太郎・國友優・寺田秀樹・小川紀一朗・松田昌之（2005）: 土砂災害の規模の表現方法に関する一考察，砂防学会誌，Vol. 57，No. 6，p. 51-55
鵜殿俊昭・森貴章・吉川和男・渡邊昌春・國友優・神山嬢子・阪上雅之・長井義樹（2016）: 大規模災害時被災調査のための SAR 画像判読性向上手法の検討，平成 28 年度砂防学会研究発表会概要集，p. B464-465
浦塚清峰・梅原俊彦・上本順平・児島正一郎・佐竹誠・小林達治（2012）: 航空機搭載合成開口レーダ Pi-SAR2 を用いた東日本大震災の被害推定，災害・危機管理 ICT シンポジウム
和田裕・山口芳雄・大倉博・鵜川元雄（2007）: ALOS-PALSAR 多偏波データを用いた火山島の地表面状況の観測，日本火山学会講演予稿集 2007，p. 45
渡辺学・島田政信・森山敏文・田殿武雄（2007）: PALSAR と PiSAR(L バンド)データを用いた土石流箇所の検出の試み，日本リモートセンシング学会誌，第 27 巻，第 4 号，p. 386-393
Chien-Ting Wu, Cheng-Yang Hsiao, Pao-Shan Hsieh (2013): Using UAV and VBS-RTK for rapid reconstruction of environmental 3D Elevation Data of the Typhoon Morakot disaster area and disaster scale assessment, Journal of Chinese Soil and Water Conservation, Vol. 44, No, 1, p. 23-33
Yamazaki, F., Liu, W., and Inoue, H. (2011): Characteristics of SAR backscattered intensity and its application to earthquake damage detection, Computational Stochastic Mechanics, p. 602-606
矢来博司・中川弘之・飛田幹男・村上亮・藤原智（2002）: 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 54 巻，第 4 号，p. 535-546
横尾泰広（2014）：航空レーザ測量の概説と最新動向，フォレストコンサル，No.137, p. 17-26
吉川和男・野中崇志・柴山卓史（2009）：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，p. 81-82
全国治水砂防協会（2001）：砂防関係事業災害対策の手引き，289 pp.
全国治水砂防協会（2016）：改訂版土砂災害防止法令の解説－土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律－，365 pp.