各種光学高分解能衛星画像による地質災害の判読—判読特性の視点から見た各種画像の比較検証—

Interpretation of geological hazard using high-resolution optical satellite imagery: Comparison of interpretation characteristics of satellite images

Abstract

We analyzed large-scale geological hazards in the case of the Northern Pakistan Earthquake, the Middle Java Earthquake and the Leyte landslide, using optical high-resolution satellite imagery such as QuickBird, IKONOS, ALOS PRISM and SPOT5. The characteristics of satellite images were compared to those of disasters on the interpretation cards. It is possible to recognize large collapses using 2.5 m-resolution satellite images; however 1 m-resolution satellite images are necessary for small-scale collapses and cracks. For the recognition of building damages in the urban area, 1 m-resolution stereo images are necessary; however it is impossible by 1 m-resolution mono image. For surface earthquake faults, it is useful to combine the recognition of building heavy damaged area using 1 m-resolution satellite image, and the identification of cliff landforms using 2.5 m-resolution stereo images. In order to understand hazard conditions, it is important for satellite imagery to be not only of high resolution but also stereoscopic.

We proposed a method for recognition of large-scale geological hazards using optical high-resolution satellite imagery.

Key words: high-resolution satellite imagery, interpretation characteristics, disaster monitoring, IKONOS, QuickBird, SPOT5, ALOS PRISM, the Northern Pakistan Earthquake, the Middle Java Earthquake, the Leyte landslide

小荒井 衛^{*†} 佐藤 浩^{*}
宇根 寛^{*} 天野一男[†]

Mamoru Koarai^{*†}, Hiroshi P. Sato^{*},
Hiroshi Une^{*} and Kazuo Amano[†]

2007年12月3日受付.

2008年10月20日受理.

^{*} 国土地理院地理地殻活動研究センター
Geography and Crustal Dynamics Research
Center, Geographical Survey Institute, 1
Kitasato, Tsukuba 305-0811, Japan

[†] 茨城大学理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering,
Ibaraki University, 2-1-1, Bunkyo, Mito 310-
8512, Japan

Corresponding author; M. Koarai,
koarai@gsi.go.jp

はじめに

1999年9月に1 m解像度の米国商用高分解能衛星IKONOSの打ち上げが成功し、名実共に高分解能衛星時代が到来した。分解能1 mクラスの精度の高分解能衛星画像を使うと、分解能が10 mよりも粗い中分解能衛星画像と同様に画像の数値処理等による事象の指標化ができるほか、航空機により撮影された空中写真と同様に肉眼判読による情報抽出も可能である。特に災害状況を把握する場合、肉眼判読能力を最大限に活用して短時間に多様な災害現象を抽出できるため、災害初期の事態把握や海外での大災害時の実態把握に際して有効な活用が期待される。

日本国内ではこれまで災害が起きると、国土地理院や民間航測会社等が災害直後の空中写真撮影を行い公開してきた(2004年新潟県中越地震, 2007年能登半島地震, 2007年新潟県中越沖地震など)。これら空中写真を使用すると、災害状況の把握や地表変動現象の把握等を容易に行うことが出来る。一方、開発途上国など外国での災害の場合、災害直後に航空機による空中写真撮影が容易でないため、高分解能衛星画像による状況の把握に頼らざるを得ない。最近では、いくつかの国にもわたるような非常に大規模な災害が発生した際には、被災地を撮影した様々な高分解能衛星画像がweb上

で公開されている。この傾向は、Google Earth 公開後に発生した2005年パキスタン北部地震以降の世界的規模の大災害ではっきりしてきた。このような状況の変化により、被災地に実際調査に入らなくても現地の災害状況の概要を容易に知ることが出来るようになった。具体的にいくつかの報告がされている(例えば、佐藤ほか, 2005など)^{脚註1)}。国内の事例としては、衛星画像を使った災害状況把握の研究例として、向山(2004, 2006)などがある。

本稿では、2005年10月8日に発生したパキスタン北部地震、2006年5月27日に発生したジャワ島中部地震、2006年2月17日に発生したレイテ島地すべりの海外で発生した3つの大規模地質災害について、web上で公開されているものも含めて光学系高分解能衛星画像を活用し、被害状況の把握とその地形学的な視点からの特性把握を試みた結果を報告する。また、筆者らがこれまでに各衛星画像を大縮尺空間データの地物判読の視点から取りまとめた結果(小荒井ほか, 2005, 2008aなど)を参考にしながら、各種光学系高分解能衛星画像の災害判読特性を判読カードに整理シカタログ化を進め、災害判読特性を比較検証した結果を報告する。こ

脚註1) 佐藤 浩・宇根 寛・小荒井 衛, 2005, パキスタン北部地震に対するイコノス画像の判読と解釈. <http://cais.gsi.go.jp/Research/geoinfo/ikonos.pdf> をあわせて参照のこと。

第1表. 光学系高分解能衛星画像の種類. ((財) リモート・センシング技術センター (RESTEC) のHP から作成: 一部 RESTEC 職員からの私信による). サブサイクルは, 同一場所の撮影間隔

衛星センサー名		分解能	観測幅	回帰日数	サブサイ クル	衛星高度	打ち上げ年月
Quick Bird USA	パナクロマティック	0.61m	16.5km	不明	5~6日(25 度以内)	450km	2001年10月
	マルチスペクトラル(4バンド)	2.44m					
IKONOS USA	パナクロマティック	1.0m	11km	11日(10 度以内)	3~5日	680km	1999年9月
	マルチスペクトラル(4バンド)	4.0m					
EROS-AI イスラエル	パナクロマティック	1.8m	12.5km	7日	2~3日	480km	2000年12月
ALOS 日本	PRISM(パナクロマティック)	2.5m	35or70km	46日	46日	692km	2006年1月
	AVNIR2(4バンド)	10m	70km		2日		
SPOT5 フランス	HRG-P(パナクロマティック)	5or2.5m	60km	26日	1~3日	822km	2002年5月
	HRG-X(4バンド)	10m					
IRS 1C インド	パナクロマティック	5.8m	70km	24日	5日(26度 以内)	817km	1995年12月
ADEOS 日本	AVNIR (パナクロマティック)	8m	80km	41日	不明	797km	1996年8月
SPOT4 フランス	HRVIR-M (パナクロマティック)	10m	60km	26日	1~3日	822km	1998年3月

これらの検証結果をもとに, 開発途上国における大規模地質災害時に, 高分解能光学衛星画像を活用して効率的に災害状況を把握する手法を体系化すると共に, 災害状況把握に必要な4つの衛星センサー特性の面から考察して, 次世代の地質災害監視衛星に必要な要件を考察した.

なお, 高分解能衛星画像とは分解能10mよりも細かい解像度の衛星画像を指す場合が多いが, 本論文では空中写真と同様の肉眼判読を対象としていることから, 2.5mよりも細かい分解能の人工衛星画像を対象とした.

地質災害の状況判読に活用できる高分解能光学衛星画像

筆者らはこれまでに, 各種高分解能衛星画像や空中写真の画素数を問引いて高分解能衛星画像と同程度の分解能にシミュレーションした画像について, 大縮尺地形図作成の視点から地物判読特性の整理を行ってきた(衛星リモートセンシング推進委員会空間データワーキンググループ, 2002; 小荒井ほか, 2002, 2005, 2008a など). また, 2005年10月8日に発生したパキスタン北部地震をはじめとして, 非常に大規模な災害があった際に, web上で公開されている高分解能衛星画像も含めて各種衛星画像を活用して, 被害状況の把握とその地形学的な視点からの特性把握を試みている(佐藤ほか, 2005; Sato et al., 2006, 2007; Koarai et al., 2006; 佐藤, 2007 など) ※脚注1.

現在, 日本で比較的入手が容易な光学系高分解能衛星画像を第1表に示す. 対象は, QuickBird(分解能0.6m), IKONOS(分解能1m), ALOS PRISM(分解能2.5m), SPOT5(分解能2.5m)などである. この表では分解能が10mよりも細かいものを取り上げた. これらの高分解能衛星画像は, 大きく2つのグループに分けられる.

1つは分解能1mクラスの商用高分解能衛星画像である.

IKONOSでは1m分解能のパナクロマティック画像と4m分解能のマルチカラー画像の合成により1m分解能のパナシャープン画像と呼ばれるカラー画像を作ることができる. より分解能の高いQuickBirdについても同様で, 0.6m分解能のパナクロマティック画像と2.4m分解能のマルチカラー画像の合成により0.6m分解能のパナシャープン画像と呼ばれるカラー画像を作ることができる. これらの商用高分解能衛星画像はポインティング機能(衛星の姿勢制御により軌道直下から離れた地域を撮影する機能)によりステレオ撮影が可能であるが, これは特別なリクエスト発注があった場合に行われる. アーカイブされている画像やweb等で公開されている画像は単画像がほとんどである. これらは観測幅が約11~17kmと広くないことと, 商用であるために高価で, 広域をカバーして利用するには経費の面でも必ずしも向いていない.

もう一つのグループは, 分解能2.5mクラスの衛星画像である. こちらは観測幅が約60~70km程度と大きく, 少数の衛星画像で広域をカバーすることが可能である. 代表例はフランスの衛星であるSPOT5であるが, ポインティング機能によるステレオ撮影が可能であり, アーカイブされたデータからステレオペアになる画像の組合せを選び出すことも容易である. また2006年1月に日本が地球観測衛星ALOS「だいち」を打ち上げたが, 2.5m分解能のステレオ撮影に特化したセンサーPRISMが搭載されており, SPOT5でのステレオ画像よりも高い判読特性が期待されている. PRISMは前方視, 直下視, 後方視の3方向に固定したセンサーからなり, 単一軌道上でステレオ視可能な画像のペアが得られる. しかし, ポインティング機能を有していないため, 同一箇所は衛星の周回周期である46日ごとでないと撮影ができないため, 必ずしも災害状況把握に向いていない.

なお、本研究で使用した 1 m クラス分解能の商用高分解能衛星画像については、web 等で公開された単画像を中心に使用した。一方、2.5 m クラス分解能の衛星画像については、ステレオペアの画像を使用した。そのため、分解能の違いによる災害状況判読特性の違いだけでなく、単画像とステレオ画像の災害状況判読特性の違いについても考察して整理した。

IKONOS 画像の配信を行っているスペースイメーシング社の web サイトでは、自由にスクロールや拡大ができ、拡大して使用している範囲では、IKONOS の画像を購入してモニタ上で使用した時と比べて遜色は無かった。日立ソフトウェアエンジニアリング社の web サイトでは自由にスクロールや拡大ができないが、QuickBird 画像を購入してモニタ上で使用したときと比べて遜色は無かった。したがって、web 配信にあたっての圧縮処理で判読特性が落ちていないものと判断した。また衛星画像の接合処理については、衛星画像の観測幅が約 11 ~ 17 km 程度のため、今回公開されている画像は 1 シーン内で収まる範囲であり、接合処理はなされていないものと判断した。

第 1 図. 対象とした地質災害の位置図

対象とした地質災害の概要と判読に使用した画像

対象とした地質災害の概要と、各災害において災害判読特性の比較検証に活用した画像は以下の通りである。災害発生箇所を第 1 図に示す。また、各地質災害で出現した災害状況と判読に使用した衛星画像を第 2 表に示した。

1. パキスタン北部地震

2005 年 10 月 8 日 8 時 50 分（日本時間 12 時 50 分）ごろ、パキスタンの首都イスラマバードの北北東約 90 km を震源として、マグニチュード（Mw: 7.6: USGS）（震源の深さ約 10 km）の地震が発生した。震央から 100 km 以内の地域は、激しい揺れに襲われ、最終的な死者は 9 万人を超えた。

パキスタン北部地震の震源地域にあたるカシミール地方は、インドプレートとユーラシアプレートの衝突によって形成されたヒマラヤ山脈の西端に当たる。パキスタン地質調査所の 100 万分 1 地質図（Geological Survey of Pakistan, 1993）によると、次のような地質構造となっている（第 2 図）。この付近の地質構造は、ほぼ東西に延びる帯状構造で特徴付けられる。主境界スラストが北西—南東方向に延び、スラストの北東側にカンブリア紀の堆積岩起源の变成岩、南西側に中新世の砂岩、シルト岩等が分布している。今回の地震では、バラコット—ガリ断層が活動した（Kumahara and Nakata, 2006; 熊原・中田, 2007）。本断層はバラコットからムザファラバードにかけては中新統分布域の南西縁付近を、ムザファラバードより南東では中新統の分布域内を、北西—南東方向に延びている。この活断層は北東傾斜の逆断層であり、今回の地震による斜面崩壊は断層の北東側（上盤側）に集中している（Sato et al., 2006）。この集中域は主に中新統の堆積岩類の分布範囲に相当する。また、バラコット—ガリ断層の中央部にムザファラバード、北西端付近にバラコットがあり、ここでの被災が著しかった。

災害状況把握の判読には、1 m クラス分解能の画像については web で公開された IKONOS 画像と QuickBird 画像のみを使用した。IKONOS 画像については、スペースイメーシング社の HP（<http://www.spaceimaging.com/gallery/AsiaEQViewer.htm>）で公開されているムザファラバード周辺の地震前の単画像（2002 年 9 月 15 日または 22 日撮影）と地震後の単画像（2005 年 10 月 9 日撮影）を使用した。いずれ

第 2 表. 災害ごとの被害の種類と判読に使用した衛星画像

災害名	被害の種類			判読に使用した衛星画像			
	斜面崩壊	建物被害	断層変位地形	QuickBird	IKONOS	ALOS PRISM	SPOT5
パキスタン 北部地震	○	○	○	○	○	—	○
ジャワ島 中部地震	—	○	—	—	○	○	—
レイテ島 地すべり	○	○	—	○	—	○	—

第2図. パキスタン北部地震震源域周辺の地質図. Geological Survey of Pakistan (1993) を修正. 活断層は, Kumahara and Nakata (2006) による. M: ムザファラバード, B: パラコット, 1: 主境界衝上断層, 2: パンジャル衝上断層. 囲み線は SPOT5 のステレオ画像の範囲. pCm: 先カンブリア系の岩石, pCs: 先カンブリア系の変成岩, pCt: 先カンブリア系の変成岩と堆積岩, Cat: カンブリア系の堆積岩 (石灰岩, ドロマイト, シルト岩, 砂岩), Cg: カンブリア系の火成岩 (花崗岩), Dm: デボン系の珪岩, ドロマイト, Mz: 中生界の堆積岩, TR: 三畳系の堆積岩, TRCp: 三畳系～白亜系の岩石 (火山岩, 堆積岩), Tep: 暁新統～始新統の堆積岩 (石灰岩, 頁岩), Tmm: 中新統の堆積岩 (砂岩, シルト岩), Q: 完新統.

も, 分解能 1 m のパンシャープン画像である. QuickBird 画像については, 日立ソフトの HP (<http://hitachisoft.jp/News/News350.html>) で公開されているパラコット周辺の地震前の単画像 (2005 年 8 月 11 日撮影) と地震後の単画像 (2005 年 10 月 19 日撮影) を使用した. いずれも, 分解能 0.6 m のパンシャープン画像である. また, Google Earth でも被災地域の画像を広域にわたって公開しており, 使用している画像は QuickBird 画像である. 広域的な災害状況を把握するため, 被災地全域について地震後の SPOT5 ステレオペア画像 (2005 年 10 月 20 日, 10 月 27 日撮影) と地震前の SPOT5 単画像 (2004 年 3 月 2 日撮影) を入手し判読を行った.

2. ジャワ島中部地震

2006 年 5 月 27 日 5 時 54 分頃 (日本時間 7 時 54 分頃), インドネシアのジャワ島中部のジョグジャカルタ近傍でマグニチュード (Mw: 6.3: USGS) の地震が発生し, 死者約 5000 人の大災害となった. 震源はジョグジャカルタ市から南南西へ約 30 km, 深さ約 12 km と推定されている.

UNOSAT (国連衛星プロジェクト) が衛星画像から推定さ

第3図. ジャワ島中部地震の被害域とその周辺の地形. UNOSAT (国連衛星プロジェクト, http://unosat.web.cern.ch/unosat/freeproducts/indonesia/UNOSAT_Java_EQ_damage30may06_highres.jpeg) の資料を元に編集.

れた被害分布と震央位置との比較を示したものを第3図に示した. 被害集中域は, ジョグジャカルタ市街から南に 10 km ほど離れたオパック川流域に存在する. この地震を発生させたのは, ジャワ島中部を南北に走る活断層 (オパック断層) の活動と考えられている (Irwan ほか, 2006). ジョグジャカルタ市街地の南東側には山地が広がっており, 平野部との境界には急崖が形成されている. この急崖に沿う形で北東-南西方向数 10 km にわたって活断層が連続している. 震央に近い活断層に沿った平野部で, 大きな被害が集中していることがわかる.

災害状況把握に使用した衛星画像は, IKONOS 画像については, シンガポール大学の HP (<http://www.crisp.nus.edu.sg/earthquake20060527/index.html>) で公開されているジョグジャカルタ周辺の分解能 1 m のパンシャープン画像 (地震前 2006 年 5 月 9 日撮影の単画像, 地震後 2006 年 5 月 28 日撮影の単画像) を使用した. ALOS PRISM 画像については, 国土地理院と宇宙航空研究開発機構 (JAXA) との共同研究協定により, 地震後 2006 年 6 月 12 日撮影の 2.5 m 分解能パナクロマティックのステレオ画像の提供を受けた.

3. レイテ島地すべり

2006 年 2 月 17 日 10 時 36 分頃 (日本時間 11 時 36 分頃), 南レイテ島サンベルナルド町ギンサウゴンで, 集落の西側にある比高 800 m に近い急崖が崩壊し, 大規模な土砂災害が発生した. この土砂災害により集落は完全に埋没し, 死者 154 人, 行方不明 990 人という大惨事になった.

災害発生原因は, 災害前に降った大量の降雨が誘因と考えられている. レイテ島では 2006 年 2 月 1 日より断続的な降雨が観測され, 災害が発生した 2 月 17 日までの被災地の南西約 40 km に位置するマーシン (被災地に最も近い気象観測地点) における累積雨量は 627 mm に達している. なお, 災害発生の前後に地震が観測されているが, 災害との関連性

第4図. レイテ島すべり周辺の地形. 等高線はNAMRIA作成5万分1地形図から作成. 活断層・リニアメント, 旧崩壊地, 谷の位置等は1952年撮影の米軍空中写真の判読による(縮尺約1/35,000: コース344-11~13, 345-23~25).

については現時点では不明である.

調査地域の山地は全体として西に傾動する地塊を形成しており, 分水嶺が東側に局在し東斜面は急崖を形成している. 今回の大規模山体崩壊はその急崖で発生した(第4図). 崩壊土量は約 $2.9 \times 10^7 \text{ m}^3$ である(消防研究センターほか, 2007). その急崖の基部に南北に延びる断層地形が明瞭に判読できるが, これはフィリピン中央断層の延長部にあたる(諏訪, 2006). 1952年撮影の米軍空中写真(縮尺約1/35,000: コース344-11~13, 345-23~25)により判読すると, 急崖に平行して南北方向の高度不連続や鞍部の直線の配列が認められ, 数本のリニアメントが存在する. 高度不連続の大きい一番西の東側低下のリニアメントと一番東の西側低下のリニアメントは, 谷線の不連続(左横ズレ)や三角末端面が認められることから, 活断層の可能性が高いものと判断される. また, 急崖の頂部に沿って崩壊地形がいくつか確認でき, この急崖がさまざまな箇所でも崩壊を何度も起こしていたことがわかる.

レイテ島の地質は, フィリピン地質図(<http://tvpacific.com/main/>)によると第三系から第四系の堆積岩類とされており, 被災斜面の地質については, 上野・地下(2006)によると, 崩壊源頭部は火山角礫岩, デイサイト質凝灰岩, 角閃石デイサイトなどの火山岩及び火山碎屑岩類から構成されている.

雨天のため被災直後の高分解能光学画像は撮影できなかった.

だが, 2006年4月16日と18日撮影のQuickBirdパンシャープ単画像を入手した. またALOS PRISM画像については, 国土地理院とJAXAとの共同研究協定により, 2006年10月10日撮影の前方視・直下視・後方視3つのステレオ画像の提供を受けた.

衛星画像の災害判読特性の比較検証方法

各種光学高分解能衛星画像の災害状況判読特性の整理にあたっては, 同一の災害状況について異なる分解能の画像で判読したものを, 1枚の判読事例カードとして整理し, それを基に考察を行った. 実際の衛星画像判読にあたっては, 様々な条件下での判読が想定される. 例えば, コンピューターのディスプレイ上で判読する場合もあれば, 出力紙に打ち出して印刷した画像を判読する場合もある. また, 実体鏡を使用して立体視を行って判読する場合もあれば, 肉眼立体視で判読を行う場合もある. したがって, 今回の判読事例カードの作成にあたっては, 判読方法は限定せず, 判読条件のみ明記してその条件下での判読結果を記載した.

その結果, 入手した衛星画像に関しては漏れなく判読を行ったパキスタン北部地震を中心に, 50枚以上の判読カードを作成した. その代表例として, パキスタン北部地震におけるムザファラバード近郊の橋梁被害の事例を第5図に示す. 判読カードの設計の基本的な考え方は, 筆者がこれまで大縮尺地形図作成に必要な地物の判読特性を整理したときの基準(衛星リモートセンシング推進委員会空間データワーキンググループ, 2002)を踏襲した.

上段には1mクラス分解能の衛星画像を貼り, 単画像であるため災害前の画像と災害後の画像をそれぞれ比較できるように並べた. 中段には2.5mクラス分解能の衛星画像を貼り, 災害前の画像1枚と災害後のステレオペア画像を, ステレオ画像については実体視出来るように並べた. 下段は, 判読条件及び判読可能性について記述した. 判読条件及び判読可能性は, 分解能の違う衛星画像毎に以下のような記号で記載した.

判読条件は以下のとおりである. 「判読したもの」については, ディスプレイ上で判読した場合には「D」, 出力紙で判読した場合は「P」と表示した. 「判読したものの縮尺(倍率)」については, 衛星画像を縮尺1/25,000相当で表示・出力して判読した場合は「25k」, 縮尺1/2,500相当で表示・出力して判読した場合は「2.5k」と表示した. 「判読方法」については, 実体鏡を使用した立体視の場合は「Ss」, 実体鏡を使用しない肉眼立体視の場合は「Sb」, 単眼視の場合は「M」と表示した. 「判読した画像」については, 判読事例カードで出力した固定倍率で判読した場合には「F」, 画像の倍率を変え画像を広域に見て判読した場合は「V」と表示した. 「判読可能性の記号」については, 容易に判読可能な場合を「◎」, 判読可能な場合を「○」, 判読にやや困難がある場合を「△」, 判読が不可能な場合を「×」と, 4段階に分けて表示した. 「判読上の特徴」については, 地上分解能の違いや単画像とステレオ画像の違いおよび判読条件による違い等を記載した. また, 災害状況を推測する観点から所見を記載

<p>災害の種類:パキスタン北部地震 (2005 年 10 月 8 日)</p>	<p>判読項目:橋梁被害</p>	
<p>IKONOS 画像(災害前・全体) ★は該当箇所</p> <p>2002 年 9 月 15 日</p>	<p>IKONOS 画像(災害前) (分解能 1m)</p> <p>2002 年 9 月 15 日</p>	<p>IKONOS 画像(災害後) (分解能 1m)</p> <p>2005 年 10 月 9 日</p>
<p>SPOT5 画像(災害前) (分解能 2.5m)</p> <p>2004 年 3 月 2 日</p>	<p>SPOT5 画像(災害後・左) (分解能 2.5m)</p> <p>2005 年 10 月 20 日</p>	<p>SPOT5 画像(災害後・右) (分解能 2.5m)</p> <p>2005 年 10 月 27 日</p>
<p>判読条件及び判読可能性</p> <p>IKONOS(パnishャープン): P,2.5K,M,F:◎</p> <p>SPOT5(パnクロマティック): P,2.5K,Sb,F:○</p>	<p>判読上の特徴</p> <p>IKONOS 画像では、単画像であるために実体視はできないが、橋梁が河川に落ちて いるのが容易に判読できる。影の状態を判読するのが決め手になっている。</p> <p>SPOT5 ステレオ画像では、分解能の関係で判読は容易ではないが、影が東側のみに ややはっきり確認できることや実体視により、東側では道路と接続しているが、西 側は道路から完全に切り離され、河川に落ちているのが判読可能である。</p>	

第 5 図. 高分解能衛星画像の災害判読特性カードの例. D: ディスプレイ上で判読 P: 出力紙上で判読 25k: 1/25,000 相当で判読 2.5k: 1/2,500 相当で判読 Ss: 実体鏡による立体視 Sb: 肉眼立体視 M: 単眼視 F: 固定倍率による判読 V: 画像の倍率を変えて判読 ◎: 容易に判読可能 ○: 判読可能 △: やや困難 ×: 判読不可能.

した。

なお、ディスプレイ上で判読するとき、CRT や液晶モニタの性能によって結果が異なる可能性はあり得るが、今回の画像判読では同一のモニタを使い、全てカードに打ち出して判読しているので、条件の差はないと考えられる。使用したディスプレイは SONY カラー液晶ディスプレイ「SDM-M81」で、画面サイズ 18.1 型 (CRT20 型相当)、最大解像度 1280 × 1024 ドット、表示色数 1677 万色相当である。

光学系高分解能衛星画像による地質災害状況の判読結果

1. 斜面崩壊の判読

ジャワ島中部地震では、被害の多くが平野部での建物被害であったため、斜面崩壊の判読はパキスタン北部地震とレイテ島地すべりを対象に行った。

1) パキスタン北部地震による斜面崩壊の判読 パキスタン北部地震に関しては、SPOT5 のステレオ画像を実体視判読し、地震前の単画像と比較することにより、地震により発生した斜面崩壊の分布を全体的に把握した (第 6 図)。SPOT5 は観測幅が広いので、斜面崩壊域をほぼカバーして判読が可能であった。全体で 2424 の斜面崩壊が判読されている。斜面崩壊は既存の活断層 (バラコット・ガリ断層; Kumahara and Nakata, 2006) に沿って断層の北東側 (逆断層の上盤側) に集中して発生しており、衛星 SAR で把握した地震による地殻変動の大きな領域 (Fujiwara et al., 2006) と一致している。特に、断層が屈曲する位置にあたるムザファラバード北部に大規模な斜面崩壊が集中している。また、断層の南西側には大規模な崩壊はわずかし確認できなかった。なお、一部断層線から離れた領域にも斜面崩壊が集中するのが確認出来るが、その原因については特定できない。

一方 IKONOS 単画像の判読では、画像の範囲内で約 100 ヶ所の斜面崩壊が確認できた。同じ範囲を SPOT5 画像のステレオ画像で判読すると、初期判読段階で約 50 個の崩壊が抽出できる。IKONOS 画像は分解能が良いので、IKONOS 画像でのみ判読可能な斜面崩壊としては、浅い表層崩壊、切土部での小規模な崩壊、地すべりの滑落崖、亀裂 (第 7 図: 左が地震前、右が地震後の画像) などがある。斜面崩壊等の地表変動は、小規模なものや浅い表層崩壊でない限りは 2.5 m 分解能でも判読可能であり、土砂崩壊により寸断された道路 (第 8 図) なども判読できる。

2) レイテ島地すべりの判読 レイテ島地すべりについては、QuickBird 画像はオフナディア角 (衛星のセンサがポイント機能を使って撮る角度) が 40° 以上と大きく、実質的な地上分解能は 1.5 ~ 2 m 程度であるが、カラー画像であるため堆積域の色調の違いが明確で、堆積域の細かな地形の違いが容易に判読できる。今回の土砂災害地域は大きく崩壊域・流送域・堆積域に 3 区分でき、単画像のため高低感がつかみにくいが、流れ山の存在も確認できる。また、崩壊域や流送域に巨礫が残っている様子も確認できる。第 9 図に堆積域の QuickBird 画像を示すが、流れ山地形は概ね下流に行くほど長径・短径・比高が小さくなる。流れ山堆積域の上流側では大型の流れ山が集中しているのに対し、下流側では小

第 6 図. パキスタン北部地震による斜面崩壊の分布。斜面崩壊の分布は、Sato et.al. (2006) による。等高線は SRTM のシャトル SAR のデータから作成。活断層は、Kumahara and Nakata (2006) による。細線囲みは、SPOT5 ステレオ画像の範囲。太線囲みは IKONOS 単画像の範囲。M: ムザファラバード、B: バラコット。

型の流れ山が集中している。長径の配列は、画像を判読する限り、上流域では長径が流下方向に対して直交しているものが多く、下流域では逆に平行方向であるものが多い。また、土砂堆積物の末端では皺状の地形が判読できるが、これは流れ山がまとまって帯状に配列し、凹部に帯水したものである。

一方、ALOS PRISM 画像は、崩壊部が雲に覆われており、流送域の一部と堆積域のみ判読が可能である。分解能が 2.5 m とやや粗く細かい地形の判読は困難であるが、実体視が可能であるため、流れ山等の高低感が決め手になる地形の判読は容易である。現地調査では、災害現場周辺の道路交差点・橋梁等の GCP (Ground Control Point: 画像に位置座標を与える基準となる点) で GPS 測量を行い、この結果を基に幾何補正した PRISM 画像から流れ山地形を図化して、流れ山地形の形状や物理量 (長径、短径、長径の卓越方向、面積、周長、流送距離など) について定量的に計測することができた (消防研究センターほか, 2007)。その結果からも、Quick Bird 単画像の判読から把握された流れ山地形の長径の配列の特徴についても、定量的に明らかにされた (小荒井ほか, 2007, 2008b)。

2. 建物被害及びその他の施設被害の判読

建物被害の判読については、パキスタン北部地震、ジャワ島中部地震、レイテ島地すべりの 3 つの災害について被災状況の判読を行った。被害の判読にあたっては、判読の容易さ

第7図. 地震による亀裂の IKONOS 画像. 左: 地震前 (2002 年 9 月 15 日撮影), 右: 地震後 (2005 年 10 月 9 日撮影).

第8図. 崩壊による道路の不通. 左: IKONOS 画像 (2005 年 10 月 9 日撮影), 右: SPOT5 画像 (2005 年 10 月 20 日撮影).

第9図. レイテ島地すべり堆積域の Quick-Bird 画像 (2006 年 4 月 16 日撮影).

第10図. ムザファラバード市街の IKONOS 画像 (佐藤ほか, 2005 より). 左: 地震前 (2000 年 9 月 22 日撮影), 右: 地震後 (2005 年 10 月 9 日撮影). 画像中の数字は本文中で説明用に使用.

第11図. ムザファラバード市街の地震後の SPOT5 ステレオ画像 (第10図と同じ箇所).

を次の指標に着目して整理した。①被害建物が大きな建物であるか否か。②市街地のように建物が密集している地域であるか、郊外のように建物が散在している地域であるか。③壊滅的な建物被害が集中している地域であるか、建物被害が散在している地域であるか。以上の3点である。

1) パキスタン北部地震での建物被害の判読 パキスタン北部地震については、IKONOS 画像を用いたムザファラバード市街中心部の建物被害の状況が報告されている（佐藤ほか、2005）。この場合、建物そのものの1軒ごとの判読は可能であるが、単画像ということもあり、個別の建物被害までは、大きな建物を除いては判読困難であった。第10図はムザファラバード市街中心部の IKONOS 画像である。「1」の茶色の建物が、地震後には屋根の骨組みのような構造が見え損壊している。「2」については、上から見ると片仮名の「ヨ」状の構造は維持しているものの、「ヨ」の縦棒の相当箇所が全壊している。「3」の建物は、左半分はかろうじて屋根の形状を維持しているものの、右半分の外縁は歪んでおり、半壊している。「4」のグラウンドには、テントらしきものが見え、人々が避難しているように見える。「5」は地震前と比較して地面が茶色く、土壌が水分を含んでいるようである。この画像に見られる他の一般建物については、どの程度の被害が出ているのかについては判読できない。ムザファラバードについては、被害が出ている建物と出ていない建物が混在しており、このような被害集中状況だと、大きな建物の被害状況などは単画像でも判読可能であるが、小さな建物まで含めた建物被害の網羅的マッピングは困難である。

他の画像の例を見る。ムザファラバード市街中心部における第10図の IKONOS 画像と同じ箇所の SPOT5 画像を第11図に示す。建物等が集中している都市部が存在することは判読できるが、画像を拡大した場合でも建物1軒ごとの判読は困難であり、建物被害の判読も不可能である。第12図はバラコット市街中心部の地震後の QuickBird 画像である。単画像ではあるが建物一軒一軒の被害の判読も可能である。

その他の施設被害状況の判読としては、IKONOS 単画像で橋梁の破壊、道路の不通・損壊（土砂崩落による）、河川の濁りなどが判読された。特に郊外部では小規模な崩壊によって道路が不通であっても、道路が何かで覆われていれば判読が可能であった。SPOT5 ステレオ画像については、郊外部においては道路の存在については判読可能であるが、道路の不通・損壊状況は、大規模な斜面崩壊等によるもののみ判読が可能であった。

2) ジャワ島中部地震、レイテ島地すべりでの建物被害の判読 ジャワ島中部地震の建物被害状況については、分解能1mの IKONOS 画像では、建物散在域では建物1軒ごとの災害状況の判読は可能である（第13図左）。色調が変化している液状化の可能性がある耕作地も判読できた。一方、建物密集域では1軒ごとの被害を網羅的に把握することは困難で、建物被害集中域の判読のみが可能であった（第13図右）。分解能2.5mの ALOS PRISM 画像では、分解能の関係で IKONOS 画像ほどの判読特性はないが、実体視することにより大きな建物であれば建物散在域での1軒ごとの被害も判読

可能であった（第14図）。ただし、建物散在域であっても、大きな建物でなければ1軒ごとの被害の判読は不可能である。

レイテ島の地すべりに関しては、現地調査で土砂に埋もれて倒壊した建物や山体崩壊の際の疾風で倒壊したと推測される建物が確認できたが、QuickBird 画像でもその存在は確認できた（第15図）。ただ単画像のために倒壊状況については画像だけでは判断困難である。一方 ALOS PRISM 画像は、何らかの構造物が存在することは判読できるが、それが倒壊した建物であることは判読不可能である。

3. 断層変位地形の判読

地表地震断層等の断層変位地形の判読特性については、それが出現したパキスタン北部地震についてのみ述べる。災害直後に公開された IKONOS 単画像では、地震断層の存在や河岸段丘の変位については、はっきりしたものは確認できなかった^{脚注 1)}。しかしながら、この地震によって地表地震断層が出現したかどうかは日本地理学会災害対応委員会のメーリングリストで、Google Earth で公開されている QuickBird の画像に関して議論があった。この経緯は宇根・熊木(2007)に詳しく紹介されている。

1) ムザファラバード北部の断層変位地形 ムザファラバード北部に、河川に斜行する崖に沿って建物被害が集中している地域があり、土木学会の予備調査団速報に現地写真が示されている^{脚注 2)}。この場所は地形的には細長い豆状の高まりとそれがなす崖に位置しており、土木学会の予備調査団速報は地形効果により揺れが集中したために建物被害が集中したものと解釈した。しかし、筆者らはその写真に示されている崖地形が河川と斜行する方向に延びていることや周辺の樹木が広範囲にわたって系統的に傾いているなどの特徴から、それらが地表地震断層の可能性が高いと考え、その背後の斜面崩壊の状況や周辺の建物や樹木の状況等からその位置を IKONOS 画像上で特定した（第16図）。ここでは建物の壊滅的な被害が発生している地域が崖に沿って線上に分布して、そこから数m程度離れた建物にはほとんど被害が無いことが確認できた。この場所は SPOT5 画像では第17図の#5にあたる場所であり、実体視判読したところ、かつての河道に沿った段丘崖で、その右岸側は河成段丘によって一段高くなっており、既存の河成段丘崖と同じ場所に現れた地表地震断層の可能性はある。この可能性については、佐藤ほか(2005)、宇根・熊木(2007)でも報告している。その崖地形の延長部にあたるジャラム川には斜面崩壊により河道閉塞を起こした跡が判読されたが、その下流部で浅瀬のようになっておりその部分で河床が隆起した可能性が指摘され、崖地形が断層変位地形である可能性を示唆している。その後、産業技術総合研究所活断層研究センターは、現地調査の結果、

^{脚注 2)} Konagai,K., Akbar,A., Oguni,K., Kodama,H. and Ikeda,T., 2005, Provisional report of the damage caused by Muzaffarabad Earthquake of October 8, 2005, Pakistan. <http://www.jsce.or.jp/report/36/index.html> を参照のこと。

^{脚注 3)} 栗田泰夫・金田平太郎・堤 浩之・中田 高, 2006, 現地調査による2005年パキスタン地震の地震断層, <http://unit.aist.go.jp/actfault/katsudo/jishin/pakistan/report01.html> を参照のこと。

この崖地形の基部に撓曲地形が存在し、河谷の系統的な左屈曲が見られることを報告している^{脚註 3)}。

2) バラコット市街地の断層変位地形 バラコットの市街地の判読は、QuickBird 画像による。バラコットにおいても丘の西向き斜面に形成されていた旧市街地が壊滅的被害を受けていたのに対して、その周辺の建物にはほとんど被害がなく、その対照がはっきりしており(第 12 図)、この丘の成因として断層変位地形が予想された(宇根・熊木, 2007)。また、QuickBird 画像においてこの丘の南延長部に当たるクンハール川において浅瀬が見られるため、その部分が地震後に隆起した可能性が高いと判断でき(宇根・熊木, 2007)、一連の地形が断層変位地形である可能性が指摘できる。この地形についても、産業技術総合研究所活断層研究センターは現地調査の結果、この西向きの斜面が断層変位による撓曲崖であることを確認した^{脚註 3)}。

各種衛星画像の災害判読特性についての考察

1. 斜面崩壊の判読特性についての考察

1 m 分解能の IKONOS 単画像と 2.5 m 分解能の SPOT5 ステレオ画像と比べた場合、浅い表層崩壊、切土部での小規模な崩壊、地すべりの滑落崖、亀裂など変化の小さな細かい地形は、より高分解能の IKONOS 画像でないと判読できないものが多かった。しかし、斜面崩壊は地表の土地被覆状況が急激に変化している場合が多く、植生のある斜面の崩壊であれば小さな斜面崩壊であっても 2.5 m 分解能の衛星画像で十分その存在は判読可能である。SPOT5 はステレオ画像なので、実体視した結果をオルソ化した SPOT5 画像に移写することにより、正確な崩壊地形のポリゴン情報を取得することができた。SPOT5 画像は観測幅が大きいので、1 つのステレオペアでパキスタン北部地震の斜面崩壊の集中域をカバーできた。IKONOS 画像で斜面崩壊の範囲を全域カバーするとかかなりの枚数の衛星画像が必要となることを考えると、経費の面から見ても全域の被害状況を明らかにする上では SPOT5 は有効であった。Sato et al. (2006) のように、全域の斜面崩壊を一定条件で抽出し、DEM と重ね合わせて斜面崩壊発生時の地形条件を検討するような研究では、SPOT5 ステレオ画像で十分その役目を果たしていると言える。

今回の研究では IKONOS 画像は web で公開されている単画像 1 枚のみを使用した。同じ範囲内の SPOT5 画像と比較した。ムザファラバード市街地を中心に 11 km 四方の範囲で比較した場合、IKONOS 単画像では災害直後の初期の段階で約 100 箇所の斜面崩壊が判読されたのに対し、SPOT5 画像によると、初期判読段階で約 50 箇所の崩壊を抽出していた。具体的に崩壊地の中のどの様なものが判読できるのかを比較してみる。SPOT5 画像では、全体的な白黒のコントラストが悪く、斜面崩壊の箇所が過剰に白く輝いており、崩壊地内の詳細な地形までの判読は困難であった。崩壊地形が判読できても、その崩壊が今回の地震で発生したものであるかどうかの判断は困難で、地震発生前の SPOT5 画像と比較対照することで判断した。一方 IKONOS 画像では、カラー画像で分解能が高い分、崩壊地内の土砂の堆積状況や堆積物の

新鮮さなども定性的に判断が可能であり、災害前の衛星画像が無くてもある程度は新鮮な崩壊であるかどうかの判断は可能である。ただし、ステレオ画像でないために、崩壊地の地形について立体感をつかみにくい。今後の 2 次災害の危険性などを判断する上では、ステレオ画像であることが望ましい。ステレオ画像の場合、図化する事により土砂崩壊量などを定量的に計算することが可能となる。今回のレイテ島地すべり災害では、ALOS PRISM ステレオ画像を使うことで、流れ山地形の形状について定量的に評価することが可能であった。

2. 建物被害の判読特性についての考察

はじめに、1 m クラス分解能の単画像について考察する。小荒井ほか(2005, 2008a)による地物の判読特性の検証では、IKONOS 画像では堅牢建物については描画・判読ともに可能であった。しかし、一般建物については判読可能であるが描画困難であった。今回の建物被害の判読結果では、IKONOS 画像については、建物そのものが 1 棟ごとに存在することの判読は可能であるが、単画像ということもあり、個別の建物被害の状況の判読は困難であった。

ムザファラバードにおける建物被害の場合(第 10 図)のように、市街地内で被害を受けた建物と受けていない建物が混在しているような被害集中状況の場合、大きな建物の被害状況などは単画像でも判読可能であるが、建物被害の網羅的マッピングは困難である。小荒井ほか(2005, 2008a)によると、実体視判読が可能であれば、一般建物の判読特性は高低感が建物の判読の鍵になるので、判読特性が向上する事が知られており、IKONOS がステレオ画像であれば、より建物被害の判読が向上するものと考えられる。しかし、建物の被害状況が半壊程度であった場合には、分解能がより高い空中写真による実体視が可能だったとしても、建物が被災しているか否かの判読は困難である。したがって、空中写真より分解能の低い高分解能衛星ステレオ画像では、半壊程度の建物被害の判読は航空写真と同様に困難である。ジャワ島中部地震の事例でも、建物散在域では建物 1 軒ごとの災害状況の判読は可能であるが(第 13 図左)、建物密集域では 1 軒ごとの被害を網羅的に把握することは困難で、建物被害集中域の判読のみが可能であった(第 13 図右)。ムザファラバード北部の断層変位地形沿いでも、同様に建物被害の集中域の判読が可能であった。建物 1 軒ごとの被害状況の判読は不可能だとしても、深刻なダメージを受けた地域をいち早く知り、災害救助を迅速に行う上で、重要な情報を提供できると考えられる。

QuickBird 画像は分解能が IKONOS 画像より高いので、判読特性が少し向上している。小荒井ほか(2005, 2008a)は、IKONOS 画像では一般建物の判読は可能であるが、描画は困難と評価し、QuickBird 画像では判読・描画ともに可能と評価した。IKONOS 画像では判読が困難な歩道・道路分離帯・並木等の道路付帯構造物の判読も、QuickBird では可能である(小荒井ほか, 2005, 2008a)。つまり、QuickBird 画像は IKONOS 画像と比べて建物被害の判読が容易であった。第 12 図のバラコットの地震後の画像では、単画像ではある

第12図. パラコットの地震後の QuickBird 画像 (2005年10月19日撮影).

第13図. ジャワ島中部地震による建物被害の IKONOS 画像 (いずれも2006年5月28日撮影).

第14図. ジャワ島中部地震による建物被害の ALOS PRISM ステレオ画像 (2006年6月12日撮影). 左: 後方視 右: 前方視.

第15図. レイテ島地すべりによる建物被害の Quick Bird 画像 (2006年4月16日撮影). 現地写真は2007年3月1日撮影.

第16図. ムザファラバード北部の帯状に伸びた壊滅的建物被害集中域の IKONOS 画像 (2005年10月9日撮影). 矢印は場所特定のために使用した地物 (樹木・建物).

第 17 図. ムザファラバード北部の帯状の壊滅的建物被害集中域の SPOT5 ステレオ画像 (Sato et al., 2006 より). # 5 は第 16 図と同じ場所.

が建物一軒一軒の被害の判読も可能であった. IKONOS 画像と QuickBird 画像については, web 上で同じ地域のものが公開されていなかったため同じ場所での災害判読特性の比較を行わなかったため, 明確な比較は出来ないが, QuickBird 画像の建物被害の判読特性の優位性を示していると考えられる. 一方で, ムザファラバードに比べてバラコットは都市の規模が小さく, 建物 1 軒ごとの判読がバラコットの方が容易であったこと, 今回の地震でのバラコットの街の建物倒壊率が高く壊滅的な被害を受けていることが, 建物倒壊の判読を容易にしている可能性が考えられる. IKONOS 画像についても, ムザファラバード北部の郊外における壊滅的建物被害集中域では建物 1 軒 1 軒の被害状況の判読が容易であったことから (第 16 図), もし IKONOS 画像でバラコットの建物被害の判読を行えば, QuickBird 画像と比べても同程度の判読精度が上がった可能性がある.

次に, 2.5 m クラス分解能のステレオ画像について考察する. SPOT5 画像はステレオ画像ではあるが, 分解能が低いため建物の倒壊状況までは判読が困難である. 第 11 図からは, 建物等が集中している都市部が存在することは判読できるが, 画像を拡大しても建物 1 棟ごとの判読は困難であり, 建物被害の判読も不可能である. 小荒井ほか (2005, 2008a) は, SPOT5 の判読特性の評価をしていないが, 分解能 5.8 m のインドの高分解能衛星 IRS 単画像の場合, 堅牢建物, プール, タンク等の大きな地物のみ判読可能であると評価した. 都市部での判読特性を比較した場合, SPOT5 画像の判読特性はほぼ IRS と同程度であると見なされる. 一方, 郊外

の住宅散在域であれば, SPOT5 画像, ALOS PRISM 画像共に, 建物の存在は 1 軒 1 軒確認できると共に, 大きな建物であれば 1 棟ごとの被害も判読可能であった (第 14 図).

その他の構造物被害判読については, IKONOS 単画像で橋梁の破壊, 道路の不通箇所・損壊 (土砂崩落による), 河川の濁りなどが判読され, 郊外部では小規模な崩壊による道路の不通箇所であっても, 道路が何かで覆われていれば判読は可能であった. SPOT5 ステレオ画像については, 郊外部においては道路の存在は判読できたが, 道路の不通箇所・損壊状況は, 大規模な斜面崩壊等によるもののみが判読できた. これは, 空中写真撮影が行えない状況下で災害直後の被災状況 (交通遮断状況) を把握するのに, 衛星画像判読が極めて有効であることを示している. この結果は, IKONOS 画像, QuickBird 画像共に道路や道路付施設については, 小規模な道路付施設を除いては判読が可能という小荒井ほか (2005, 2008a) の評価と調和的な結果である.

3. 断層変位地形の判読特性についての考察

断層変位地形については, 衛星画像のみで断層変位地形の可能性の高い地形を判読することが出来た. ただし, 1 m クラス分解能の単画像では実体視が出来ないため, 断層変位地形の抽出は不可能であった. 活断層近傍の帯状に繋がる壊滅的建物被害集中域が判読できた. 一方, 2.5 m 分解能のステレオ画像では, 実体視により地表地震断層の可能性のある崖地形の抽出は可能であったが, 分解能は低かったため詳細な判読は出来なかった. 衛星画像や現地写真で確認できた帯状に繋がる壊滅的建物被害集中域の存在は極めて特異であるこ

第3表. 各地質災害種別毎の衛星画像による判読特性.

地質災害の種類		衛星画像	QuickBird	IKONOS	IKONOS	ALOS PRISM	SPOT5
			単	ステレオ	単	ステレオ	ステレオ
斜面崩壊	一般的斜面崩壊		○	(○)	○	○	○
	浅い表層崩壊		○	(○)	○	(×)	×
	切土部の小規模崩壊		○	(○)	○	(×)	×
	地すべり		○	(○)	○	○	○
	亀裂		○	(○)	○	(×)	×
	流れ山地形		○	(○)	○	○	(○)
	崩壊域に残された岩塊		○	(○)	○	×	×
建物被害	市街地	建物の存在	○	(○)	○	×	×
		壊滅的被害域	◎	(◎)	○	△	△
		大きな建物の被害	○	(○)	○	×	×
		一般建物の全壊	△	(△)	×	×	×
		一般建物の半壊	×	(×)	×	×	×
	郊外	建物の存在	◎	(◎)	◎	○	○
		壊滅的被害域	◎	(◎)	○	○	○
		大きな建物の被害	○	(○)	○	○	△
		一般建物の全壊	○	(○)	△	×	×
		一般建物の半壊	×	(×)	×	×	×
	その他の施設被害	橋梁の被害	◎	(◎)	◎	○	○
		道路の不通(土砂)	◎	(◎)	◎	(○)	△
		道路の不通(亀裂等)	○	(○)	○	×	×
		道路の不通(大きな土砂災害)	◎	(◎)	◎	○	○
断層変位 地形	断層崖・撓曲崖		×	(◎)	×	(○)	○
	建物被害密集域		○	(○)	○	(△)	△
	河床の変化		△	(○)	△	(×)	×

◎：判読良好；○：判読可能；△：条件により判読可能（困難あり）；×：判読不可能

() 書きは、今回判読していないが、小荒井ほか（2005）などから推定して判断した結果

とから、2.5 m クラス分解能のステレオ画像で確認できた崖地形と、1 m クラスの高分解能単画像で確認できる様々な特異な現象（川の浅瀬の存在など）から判断される事象を組み合わせることにより、断層変位地形の存在とその位置を大きな確度で認定することが出来た。ただし、最終的には、現地確認が必要である。現地調査前の断層変位地形抽出作業に当たって、ステレオ視可能な衛星画像が利用できれば極めて有効である。また、高分解能の衛星画像であれば実体視判読という空中写真とはほぼ同様な手法での活用が可能である。

高分解能光学衛星画像を用いた 災害状況把握手法についての考察

1. 地質災害判読のための高分解能光学衛星画像の利用法と限界

これまでに述べてきた各種高分解能光学衛星画像の災害状況判読特性を、各災害種別に整理して一覧にまとめたものを第3表に示す。1 m クラスの商用高分解能衛星画像は高価で容易に入手できなかったために、web 公開画像を使って検討したのでステレオ画像が使えなかった。そのため、1 m クラス分解能単画像（カラー）と2.5 m クラス分解能ステレオ画像（白黒）とを比較した。なお、IKONOS のステレオ画像と

ALOS PRISM のステレオ画像の一部については、今回の判読カード作成の対象となっていない。そのため、筆者らがこれまでに地物の判読特性の整理を行ってきた研究成果（小荒井ほか, 2005, 2008a など）を参考にして推定した結果を、括弧書きで表示してある。この表を見ると、地質災害の種類によらず、より高分解能な衛星画像の方が判読特性は良く、単画像よりもステレオ画像の判読特性が良い。しかし、地質災害の種類によって適用可能な衛星画像の分解能等が違ってくるので、災害時の災害状況把握における最適な高分解能光学衛星画像の利用法とその限界について考察する。

基本的には高分解能の衛星画像の方が判読特性は良いが、高分解能ほど観測幅が狭くなるため、判読に必要な衛星画像のシーン数が多くなり、現実的ではない。そのため、まずは広域を2.5 m クラス分解能のステレオ画像で判読して災害状況の概要を知り、被害集中域等をピンポイントでより高分解能の1 m クラス分解能衛星画像で判読することが望ましい。

地震等の地質災害が発生した場合、発災直後の緊急対応時には、大規模被害発生域を早期に特定・把握し、人命に係る避難・救出活動が適切に行われるよう、その情報を災害対策本部等に早急に提供することが肝要である。特に、土砂災害発生場所、建物壊滅的被害集中域、交通インフラ状態、液状

第4表. 災害状況判読の視点で見た各衛星センサの特徴.

衛星センサ 機能	QuickBird	IKONOS	ALOS PRISM	SPOT5
高分解能	◎	○	△	△
ステレオ撮影	△	△	◎	○
ポインティング機能(撮影間隔)	○	○	×	○
観測幅	△	△	○	○

◎: 非常に良好; ○: 良好; △: やや問題有; ×: 不可能

化に関する情報が重要である。2.5 m 分解能の衛星画像の目視判読により、大規模な地すべり・土砂災害が多数発生した地域の状況把握、河道閉塞の抽出等が可能であり、幹線道路の通行不能状態については、土砂崩壊によるものや橋梁落下によるものは抽出可能である。一方、市街地における建物被害の判読については1 m クラスの分解能が必要で、出来ればステレオ画像が望ましい。しかし、建物壊滅的被害集中域については、2.5 m 分解能衛星画像でも抽出可能な事例が多いことから、応急対応時には人命に係る避難・救出活動を適切に行う視点から、建物被害に関しては壊滅的被害集中域に特化して抽出作業を行った方がよい。

発災直後の応急対応時以降、被災施設の特定、地形変動の抽出、一般的災害状況の把握等が必要になってくる。この段階になって、1 m クラスの分解能の衛星画像の目視判読による情報抽出が必要になってくる。斜面崩壊については、単画像や2.5 m 分解能でも判読は可能であるが、単画像では斜面崩壊の形状等を正確に捉えることは出来ず、小規模な崩壊や浅い表層崩壊、クラック等の判読は2.5 m 分解能では困難もしくは不可能であり、1 m 分解能が必要である。一方、建物被害については1 m 分解能であっても限界があり、市街地では大きな建物の被害であれば判読は可能であるが、一般建物の全壊・半壊は判読が困難もしくは不可能である。郊外であっても、一般建物の全壊は単画像では困難であり、一般建物の半壊の場合はIKONOSのステレオ画像や0.6 m 分解能のQuickBird画像であっても判読は不可能である。断層変位地形については、地形の上下変化等が判読の鍵になるので、ステレオ画像でないと判読が困難である。2.5 m クラス分解能のステレオ画像による崖地形の抽出と、1 m クラス分解能の単画像による建物被害密集域抽出の組み合わせで、初めて判読が可能である。なお、衛星画像でも画像の端での倒れ込みがあり、オフナディア角が大きい時には急峻で起伏量が大きな山岳地において判読の障害となることが想定される。今回の研究で使用された画像と地形条件とを照らし合わせてみると、建物被害の判読については都市部の平らな部分であったために特段の障害はなかった。また、地表地震断層の判読についても山地内の平野部での実体視判読が主であったため、特段の支障は無かった。斜面崩壊の判読については、山地部での判読であるために多少の障害が考えられるが、今回はステレオ画像を実体視判読し、それをステレオ画像から作成したオルソ画像に移写する形で斜面崩壊のポリゴンデータ

を作成したために、判読上の困難は無かった。唯一、レイテ地すべりの高分解能画像は、単画像でオフナディア角が大きかったため、崩壊部の判読では立体感が無くのっぺりしてしまい、やや判読が困難であると共に、判読したものを他の空間情報と組み合わせて使うことが不可能であった。山地部での災害状況の判読には、直下視の画像かステレオ画像を使うようにするのが望ましい。

2. 各種衛星センサの評価と次世代地質災害監視衛星の満たすべき要件についての考察

災害状況判読という視点で総合的に各センサの特性を評価して整理したものを第4表に示す。災害対応という視点でセンサの特性を考えたとき、高分解能、広い観測幅、高頻度撮影、実体視可能な4つが大きな特性になる。これらの特性は、相互に相殺する。例えば、同じレンズ特性であれば高分解能になるほど衛星高度を下げることになるので観測幅が狭くなる。もしくは、高分解能だとデータ量が大きくなるため、それが制約条件となって観測幅を広く出来ない可能性がある。一方、ステレオセンサとしての特性を高度なものにするには、ポインティング機能を持たせずにセンサを固定することになるので(ALOS PRISMがその代表例)、撮影頻度は極端に低くなる。

高分解能については、2.5 m クラス分解能の衛星画像よりも1 m クラス分解能の衛星画像の災害判読特性が良いので、1 m クラス分解能センサの方を2.5 m クラス分解能センサよりも高く評価した。QuickBirdについてはIKONOSよりも災害判読特性が良かったので、より高く評価した。観測幅については、1 m クラス分解能衛星が11～16 km、2.5 m クラス分解能衛星が約60～70 kmなので、2.5 m クラス分解能衛星センサの方を高く評価した。ステレオ撮影に関してはどのセンサも可能ではあるが、商用高分解能衛星では実際にステレオ撮影のアーカイブが余りなされていないので、その点は多少低く評価した。一方、ALOS PRISMについては、ポインティングによる実体視ではなく三方向センサによる実体視であるため、確実に良好なステレオ画像が撮影できることからより高く評価した。ポインティング機能(撮影間隔)については、ALOS PRISM センサについてはポインティング機能を有せず撮影間隔が46日であることは、災害状況把握目的には不利であることから低く評価した。

このようにして作成した第4表を見ると、1 m クラス分解能衛星センサと2.5 m クラス分解能衛星センサとは、災害状

況把握に必要な特性を相互補完的に有していることが判る。観測幅とステレオ撮影で優位な特性を持つ 2.5 m クラス分解能衛星センサ（特に SPOT5）で広域をステレオ撮影して概況を把握し、高分解能で優位な特性を持つ 1m クラス分解能センサで災害状況の詳細を把握するという相互補完方法である。ALOS PRISM については、撮影間隔の面で災害状況把握での利活用に不利であり、活躍する場は少ないと想定されるが、タイミング良く災害状況を撮影された場合には、ステレオ撮影の面で他のセンサと比べて優位な特性を有しており、災害状況把握の面で有意義な情報を提供することが可能である。

今後、災害監視に特化した高分解能光学衛星が打ち上げられる可能性もあり、地質災害の状況把握に必要な衛星センサの要件について、4つの特性の視点から考察する。災害状況を的確に把握するためには、1 m クラスの高分解能でのステレオ撮影が不可欠である。安定したステレオ撮影を行うためには、ポインティング機能によるステレオ撮影ではなく、ALOS PRISM センサのように2方向以上のセンサ（例えば、直下視と後方視）による同一軌道内でのステレオ撮影が、常に出来るセンサ設計が望ましい。むしろ、高頻度の撮影をするためには、ポインティング機能を有していることも必要な条件である。観測幅については、M7 クラスの活断層起因の内陸地震の場合（例えば、1995 年兵庫県南部地震など）の被害域を1シーンでカバーできることを考えると、震央周辺で 50 km 四方程度の観測幅が必要である。観測頻度に関しては、緊急対応時の災害状況把握のニーズを考えると、発災後 3 時間以内の観測が必要であるが、ポインティング機能を有していても1機体制では困難で、数機体制が必要になると考えられる。

次世代の災害監視用の高分解能光学衛星センサとしては、分解能がパンクロマティックで 1 m、マルチスペクトルで 4 m、観測幅 50 km 以上、2 方向以上のセンサを有して同一軌道内のステレオ撮影が常時可能で、ポインティング機能を有した衛星センサの数機運用による 3 時間毎の撮影間隔という要件が必要と考える。

ま と め

開発途上国において発生したパキスタン北部地震、ジャワ島中部地震、レイテ島地すべりの3つの大規模な地質災害に関して、高分解能光学衛星画像を活用して、斜面崩壊、建物被害、断層変位地形等の災害状況について判読を行った。様々な分解能の高分解能衛星画像を使用して判読を行い、同一の災害事象についての判読結果を判読事例カードにとりまとめ、それぞれの衛星画像の災害判読特性を比較検証してとりまとめた。

その結果、2.5 m 分解能の衛星画像では斜面崩壊の判読は可能であったが、表層崩壊や亀裂などの判読は 1 m 分解能程度の衛星画像が必要であることが分かった。建物被害等の判読は 2.5 m 分解能では不可能で、1 m 分解能が必要であるが、単画像では実体視ができないため都市部での網羅的な被害のマッピングは困難である。壊滅的被害の集中域では、単

画像でも判読は可能である。また、QuickBird 画像の方が、IKONOS より分解能が細かい分、建物被害の判読には有利であった。断層変位地形の判読については、1 m 分解能でも単画像では高低感が捉えられないため困難である。ただし、1 m 分解能で建物壊滅的被害集中域が判読できたので、2.5 m 分解能のステレオ画像の判読と組み合わせて、地表地震断層の可能性のある地形を抽出でき、活断層研究者の現地調査により確認ができた。1 m クラス単画像と 2.5 m クラスステレオ画像とを比較した結果、高分解能の方が判読特性は一般的には優れているが、災害判読における実体視判読の有用性も示すことができた。

以上の結果を基に、開発途上国を対象に高分解能光学衛星画像を使用した大規模地質災害の状況把握手法を整理した。初期段階で広域を 2.5 m クラス分解能のステレオ画像で判読して災害状況の概要を知り、被害集中域等をピンポイントでより高分解能の 1 m クラス分解能衛星画像で判読することが必要である。特に、発災直後の緊急対応時には、土砂災害の発生箇所の把握と建物壊滅的被害集中域の把握が極めて重要であり、2.5 m クラス分解能のステレオ画像による広域的な災害概要把握が重要である。また、各衛星画像を災害状況把握へ利活用する観点から、高分解能、広い観測幅、高頻度撮影、実体視可能な4つの特性の視点で現行の衛星センサを評価して整理した。その結果、今後の災害監視に特化した高分解能光学衛星の打ち上げを視野に入れた場合、分解能 1 m、観測幅 50 km 以上、同一軌道内のステレオ撮影が常時可能で、ポインティング機能を有するという衛星センサが必要である。

謝 辞

断層変位地形の判読に関しては、日本地理学会災害対応委員会 ML での議論が参考になった。また、ALOS PRISM 画像については、宇宙航空研究開発機構（JAXA）からの提供を受けると共に、判読画像作成にあつては国土地理院地理地殻活動研究センター地理情報解析研究室の神谷泉主任研究官にお世話になった。判読事例集の作成、および図表の作成にあたっては同室の村上弘明氏にお世話になった。また、web に公開されている高分解能衛星画像の本論文での使用については、日本スペースイメージング社、日立ソフトウェアエンジニアリング（株）の了解を得た。また、匿名の査読者2名の方と編集企画委員の能美洋介氏には、原稿を大幅に改善する貴重な御意見を頂いた。これらの方々に感謝する。

文 献

- 衛星リモートセンシング推進委員会空間データワーキンググループ、2002、高分解能衛星画像による地物の判読可能性。171p。
 Fujiwara, S., Tobita, M., Sato, H.P., Ozawa, S., Une, H., Koarai, M., Nakai, H., Fujiwara, M., Yurai, H., Nishimura T. and Hayashi, F., 2006, Satellite data gives snapshot of the 2005 Pakistan earthquake. *EOS, trans. AGU.*, **87**, 73-77.
 Geological Survey of Pakistan, 1993, Geological map of Pakistan 1: 1,000,000.
 Irwan, M.・安藤雅孝・奥田 隆・木股文昭, 2006, 2006 年 5 月 27 日ジョグジャ地震の緊急地震調査。日本地震学会ニュースレター, **18**-

- 3, 11-13.
- 小荒井 衛・飯田 洋・都留宏介・樋野隆司・峰島貞治・洲濱智幸・蔭山邦幸, 2005, 各種高分解能衛星画像地物判読可能性の検討. 日本写真測量学会平成 17 年度秋季学術講演会発表論文集, 21-24.
- 小荒井 衛・飯田 洋・都留宏介・樋野隆司・峰島貞治・洲濱智幸・蔭山邦幸, 2008a, 高分解能衛星画像の大縮尺地形図作成のための地物判読特性についての体系的整理. 地図, **46**-3, 13-28.
- 小荒井 衛・飯田 洋・渡辺信之・吉永新一郎・都留宏介・樋野隆司・井上 潮・洲濱智幸・中村 忠, 2002, 高分解能衛星画像 (IKONOS 画像) による地物の判読可能性について. 日本写真測量学会平成 14 年度学術講演会発表論文集, 169-174.
- 小荒井 衛・佐藤 浩・新井場公徳・小山内信智・伊藤英之, 2008b, 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, **45**-2, 14-25.
- 小荒井 衛・佐藤 浩・神谷 泉・新井場公徳・小山内信智・伊藤英之, 2007, レイテ島地すべりの地形的特徴. 国土地理院時報, **113**, 111-120.
- Koarai, M., Sato, H. P., Une, H. and Kamiya, I., 2006, Interpretation of high-resolution satellite imageries to detect the landform changes and disaster damages: Case study of the northern Pakistan earthquake. *Asia-Pacific Remote Sensing Proceedings*, 6412-6420.
- Kumahara, Y. and Nakata, T., 2006, *Active faults in the Epicentral Area of the 2005 Pakistan Earthquake*. Research Center for Regional Geography, Hiroshima University, 54p.
- 熊原康博・中田 高, 2007, CORONA 偵察衛星写真の判読に基づく 2005 年パキスタン地震の起震断層の認定. *E-journal GEO*, **2**-2, 72-85.
- 向山 栄, 2004, 平成 16 年新潟県中越地震の被災状況を IKONOS 衛星画像で見る, 写真測量とリモートセンシング, **43**-6, 2-3.
- 向山 栄, 2006, 地震災害発生直後に期待する災害情報の特性と IKONOS 衛星画像の利用, 先端測量技術, **89**・**90**, 108-113.
- 佐藤 浩, 2007, 2005 年パキスタン北部地震による斜面崩壊の分布. *E-journal GEO*, **2**-2, 104-120.
- Sato, H. P., Hasegawa, H., Fujiwara, S., Tobita, T., Koarai, M., Une, H. and Iwahashi, J., 2007, Interpretation of landslide distribution triggered by the 2005 Northern Pakistan earthquake using SPOT5 imagery. *Landslide*, **4**, 113-122.
- Sato, H. P., Koarai, M., Une, H., Hasegawa, H., Iwahashi, J., Kamiya, I. and Ishitsuka, Y., 2006, Interpretation of Landslide Distribution triggered by the Northern Pakistan Earthquake on 8 October 2005 using 2.5m-resolution SPOT5 Stereo-imagery. *Extended abstract of international conference on earthquake in Pakistan*, 94-98. Geological Survey of Pakistan.
- 佐藤 浩・宇根 寛・小荒井 衛, 2005, パキスタン北部地震に対するイコノス画像の判読と解釈. 写真測量とリモートセンシング, **44**-6, 2-3.
- 諏訪 浩, 2006, フィリピン・レイテ島で 2006 年 2 月 17 日に起きた地すべり災害. **25**-1, 83-87.
- 消防研究センター・国土技術政策総合研究所・国土地理院, 2007, フィリピン・レイテ島地すべり災害における救援活動の実態と応援技術の性能調査報告書. 44p.
- 上野宏共・地下まゆみ, 2006, フィリピン共和国レイテ島地すべりと地質. 地質ニュース, no.622, 41-48.
- 宇根 寛・熊木洋太, 2007, パキスタン北部地震による地表断層変位の“リモートセンシング”. *E-journal GEO*, **2**-2, 86-94.

(要 旨)

小荒井 衛・佐藤 浩・宇根 寛・天野一男, 2008, 各種光学高分解能衛星画像による地質災害の判読—判読特性の視点から見た各種画像の比較検証—. 地質雑, **114**, 632-647. (Koarai, M., Sato, H. P., Une, H. and Amano, K., 2008, Interpretation of geological hazard using high-resolution optical satellite imagery: Comparison of interpretation characteristics of satellite images. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **114**, 632-647.)

パキスタン北部地震, ジャワ島中部地震, レイテ島地すべり等の大規模地質災害について, 光学系高分解能衛星画像により被害状況と地形的な特性把握を試みた. また, 高分解能衛星画像の災害判読特性を判読カードに整理しカタログ化を進め比較検証した. 2.5 m 分解能の衛星画像で斜面崩壊の判読は可能だが, 小規模な表層崩壊や亀裂などの判読は 1 m 以上の分解能が必要であった. 建物被害等の判読には 1 m 分解能が必要である. しかしながら単画像では実体視ができないため, 1 m 分解能でも単画像では都市部での網羅的な建物被害のマッピングは困難である. 断層変位地形の判読については, 1 m 分解能でも単画像では高低感が捉えられないため困難である. ただし, 建物被害集中域が判読できたので, 2.5 m 分解能のステレオ画像の判読と組み合わせることで, 地表地震断層の可能性のある地形を抽出できた. 各衛星画像を比較した結果, 高分解能の方が判読特性は一般的には優れているが, 災害判読における実体視判読の有用性も示すことができた. 本研究の考察を通して, 高分解能光学衛星画像を使用した大規模地質災害の状況把握手法を提案した.