調査報告

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” “Remotely sensed” surface fault rupture accompanied with the northern Pakistan earthquake

宇根 寛・熊木 洋太
UNE Hiroshi and KUMAKI Yohta

高解像度衛星画像は、数 10 cm の解像度で地表の詳細な画像を提供するが、高価であることから、地形学的研究には十分利用されてこなかった。パキスタン北部地震発生直後の 2005 年 10 月 12 日、ムザファラバード周辺のイコノス衛星画像がインターネットで無償公開された。さらにその直後、衛星画像の無償閲覧サイトとして注目されているグーグルアースが、被災地域のクイックバード衛星画像の提供を開始した。著者らはこれらの画像を用いて地形変化の判読を行い、撓曲崖、河床の離水、地表地震断層などの断層変位に伴う地形を見いだすことができた。これらの画像は簡易なオルソ化が行われており、実体視ができないことは変位地形の判読に不利であったが、地震前後の画像の比較や、SPOT5 などのやや解像度の低い衛星画像の実体視判読などにより、判読を補うことができた。また、日本地理学会災害対応グループのメーリングリストによるオープンな意見交換も変位地形の認定に有益であった。

High resolution satellite imagery can provide detailed observation of ground surface with sub-meter resolution, but not so much widely used for geomorphologic study because of its costs. On October 12th, 2005, free images of Muzaffarabad, central town in seriously damaged area, and its surrounding area from IKONOS satellite before and after the earthquake were released on the web. It was followed by the release of free QuickBird imagery of affected area after the earthquake on the GoogleEarth which is the most popular satellite imagery viewing tool on the Internet. We interpreted these images to find the appearance of deformation of landform caused by the slip on faults, and detected some evidences of surface faulting such as flexure scarplet, emerged river bed and earthquake fault scarplet on the river terrace. These images are orthorectified and not ready for stereoscopic observation. However, we concluded them by using other supporting information, i.e. the comparison to pre-earthquake images and stereoscopic interpretation of lower resolution satellite images such as SPOT-5. The open discussions among researchers on the mailing list of Association of Japanese Geographers were also useful to certify them.

キーワード：地震断層，地表変位，高解像度衛星画像，パキスタン北部地震

Key words: earthquake fault, surface rupture, high resolution satellite imagery, Northern Pakistan earthquake

I はじめに

地震による被災状況やその空間的分布，地表地震断層などの地表の変動を把握するためには，空

中写真をいち早く撮影し、これを判読することが極めて有効である。近年わが国を襲った大規模な地震災害に関しては、国土地理院や民間航空測量会社をはじめとして多くの機関が空中写真を撮影、提供し、その判読により大きな成果が得られてきた。例えば、2004 年新潟県中越地震に際しては、国土地理院は、地震発生直後に空中写真の緊急撮影を決定して撮影計画を立案し、翌日早朝から撮影を実施して、直ちに関係機関に提供するとともに、災害状況の判読を行い、5 日後には災害状況図を公開した(宇根ほか 2005)。また、1995 年兵庫県南部地震の際には、国土地理院は地震当日の午後には空中写真の撮影を行い、翌日から写真の判読を開始した。

2005 年 10 月 8 日にパキスタン支配下のカシミール地方を震源として発生した Mw 7.6 の大地震(以下「パキスタン北部地震」と表記)については、7 万人を超える犠牲者を出すなど、広い範囲にわたる著しい被害が発生した(図 1)が、これまでのところ、被災の全体像を把握できるような広域の空中写真撮影が行われたとの情報はない。しかしな

図 1 パキスタン北部地震の被災地域(旧ソ連作成 50 万分 1 を使用)。M: ムザファラバード, B: バラコット, 数字は本報告中の図番号に対応。

Figure 1 Damaged Area of the North Pakistan Earthquake of 2005.
M: Muzaffarabad, B: Balakot
Numbers correspond the figures in this paper.

がら、発生の数日後に高解像度の人工衛星画像がインターネットを通じて公開され、これにより被災状況、地表変位をかなりの程度まで把握することができた。

本稿では、パキスタン北部地震に関して、高解像度人工衛星画像がどのように公開され、それを判読することにより地表の変位がどの程度把握できたかを報告し、発展途上国や山岳地域など、現地調査や空中写真の入手が困難な地域で地震が発生した場合に、地震災害の状況や地表の変位などを遠く離れた地域からでも探査することが可能となってきたことを示す。

II 高解像度衛星画像の公開

1999 年、初の民間高解像度衛星 IKONOS (以下「イコノス」と表記)が打ち上げられた。解像度はパンクロ 1 m, マルチスペクトル 4 m である。さらに、2001 年には、最高でパンクロ 0.6 m, マルチスペクトル 2.4 m の解像度を持つ民間高解像度衛星 QuickBird (以下「クイックバード」と表記)が打ち上げられた。これらの衛星は、ともに 45 度までの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)を持ち、最大 3 日で地球上のあらゆる地点の詳細な地表画像を提供することができる(ただし光学画像であるから雲があれば撮影できない)。このため、空中写真の撮影、入手が困難な地域における地震被害や地表変動の判読にたいへん有効であるが、画像がかなり高価(アーカイブ画像の購入で 1 km² あたり数千円~1 万数千円)であることから、地形的研究に利用された事例はほとんどなかった。

しかしながら、パキスタン北部地震に関しては、状況がこれまでと全く異なった。発生直後の 10 月 12 日、大きな被害が発生したムザファラバード周辺のイコノス画像がインターネットで無償公開¹⁾された(図 2)。地震前の 2002 年 9 月に撮影された画像が左に、地震直後の 2005 年 10 月 9 日に撮影された画像が右に表示され、地震前後の変化が一目で観察できる。また、画像の下ボタンを使って左右の画像を同時に拡大・縮小、スクロール

でき、最大に拡大すると、斜面崩壊（図 3）や、倒壊した建物や破損した構造物、さらには広場に住民が避難している様子（図 4）などがはっきりと確認できる。

さらにその直後の 10 月 17 日には、衛星画像の無償閲覧サイトとして注目されている Google

図 2 インターネットに公開されたムザファラバード周辺の地震前後のイコノス衛星画像（スペースイメーシング社ホームページより）

Figure 2 IKONOS Satellite images of Muzaffarabad and its surroundings before and after the Earthquake released on Internet (quoted from Space Imaging's home page)

図 3 ムザファラバード北方の斜面崩壊地のイコノス衛星画像（スペースイメーシング社ホームページより）

Figure 3 IKONOS Satellite images of slope failures at north Muzaffarabad (quoted from Space Imaging's home page)

Earth(以下「グーグルアース」と表記)で、被災地域の地震後の高解像度衛星画像が閲覧できるようになった。その情報源は明示されていないが、Digital Globe のクレジットが表示されることから、クイックバード画像が提供されていることは間違いない。閲覧可能な地域は、ムザファラバードの北西の約 20 km 四方で、グーグルアースの機能を用いて、マウスを使って簡単に拡大・縮小、スクロールすることができるほか、ユーザが任意の情報を追加することができる。閲覧できる地域では、山岳地域を地震断層が通過することから、断層沿いに多数発生した地すべりや斜面崩壊が詳細に観察できる（図 5）。

続いて、10 月 25 日には、日本におけるクイックバード画像の総代理店である日立ソフトのホームページ²⁾に、バラコット周辺の地震前後のクイックバード画像が無償公開された（図 6）。地震前の画像は 2005 年 8 月 11 日撮影、地震後の画像は 2005 年 10 月 19 日撮影である。画像は jpeg 画像としてダウンロードしてそのまま利用することができる。併せて、画像に含まれる 6 地点について、地震前後の画像を比較し、建物の崩落や避難民のテント、土砂崩落などを判読した解析結果が公開された。

図 4 ムザファラバード中心部のイコノス衛星画像。倒壊した建物や校庭らしい広場に集まる避難民などが判読できる（スペースイメーシング社ホームページより）

Figure 4 IKONOS Satellite images of city center of north Muzaffarabad. Collapsed buildings and homeless people on an open space, possibly a schoolyard, are visible (quoted from Space Imaging's home page)

図5 グーグルアースで公開された被災地域のクイックバード衛星画像. 地すべりの微地形が明瞭に判読できる

Figure 5 QuickBird Satellite image of damaged area published through Google Earth. Micro landforms created by landslides are clearly visible (quoted from Google Earth)

図6 日立ソフトによる地震被災地域のクイックバード画像提供のページ (<http://www.hitachisoft.jp/News/News350.htm>)

Figure 6 Web page for publishing QuickBird Satellite images of damaged area operated by Hitachi Software (quoted from Hitachi-Soft home page)

このように高解像度の衛星画像がインターネット上に無償で公開されたことは、これまでになかったことである。情報や交通が途絶し、被災地域が孤立して、地震とその被害に関する情報がほとんど伝えられないにもかかわらず、世界中の誰もが、現地の被害のすさまじさを、まざまざと間近から見るように知ることができたことは、災害

情報の革命と言っても過言ではないのではなかろうか。

III 高解像度衛星画像による地表変位の認定

パキスタン北部地震は、その規模 (Mw 7.6) と震源の深さ (26 km) (いずれも USGS による), さらには八木 (2005) の断層破壊モデルなどから、断層破壊が地表に到達して地表地震断層が生じていることが予想された。しかしながら、7万人を超える犠牲者を出す著しい被害が発生したこと、険しい山岳地帯で、交通、通信網が寸断されたこと、さらには、帰属を巡ってパキスタンとインドが係争中であるカシミール地域が被災の中心となったことなどから、地震発生後しばらくは十分な現地調査が行われず、断層変位の報告もなかった。

一方、II で述べたように、インターネット上には、地震直後から、高解像度衛星画像が多数公開された。これらを地形学的観点で詳細に判読することにより、地震に伴う地表の変位に関する地形学的知見を得ることができた。

衛星画像によるものではないが、熊木は、10月14日に、日本地理学会災害対応グループのメーリングリストに、10月10日にAFP=時事で配信され、静岡新聞に掲載されたバラコット北方の斜め空中写真 (図7) を紹介し、写真右手前から左遠方に向かって高度を減じる山麓緩斜面ないし扇状地を斜めに横切ってナマコ状の異常な凸地形が直線状に伸び、建物の被害がこの丘 (以下「バラコットの丘」と表記) に集中していることを指摘し、Nakata et al. (1991) に図示されている活断層の延長上であること、八木 (2005) のモデルからも断層変位がバラコット周辺まで達していることが推定されることから、バラコットの丘が断層変位による地形であることを示唆した。そうだとすれば、バラコットの丘は tectonic bulge と考えられ、その基部に、写真左側が右側に乗り上げる逆断層が想定される。

さらに、10月17日にグーグルアースでクイックバード画像が提供されてからは、災害対応グループのメーリングリストなどを通じて、著者らと中

図7 新聞に掲載されたバラコット北方の異常な地形と家屋の被害の空中写真 (AFP時事. 静岡新聞 2005 年 10 月 10 日に掲載)

Figure 7 Aerial photo appeared in a newspaper showing an abnormal landform and the damages in northern Balakot (AFP=JIJI. Published on October 10, 2005 on Shizuoka Shinbun.)

田 高氏 (広島工業大学), 鈴木康弘氏 (名古屋大学) などが, 地表地震断層が認定できるかどうかを議論した. グーグルアースでは確実に地表地震断層であると認定できたものはなかったが, 多数の斜面崩壊や地すべりが, 中田・熊原 (2005)

図9 クイックバード画像にみるバラコット南方のクンハール川の河床の変化. 左: 地震後, 右: 地震前 (日立ソフトホームページより)

Figure 9 QuickBird Satellite images showing the change of river bed of Kunhar River in southern Balakot (quoted from Hitachi Soft home page)

図8 バラコット北方の被害集中域のクイックバード画像 (日立ソフトホームページより)

Figure 8 QuickBird Satellite image showing concentration of damages in northern Balakot (quoted from Hitachi Soft home page)

の Muzaffarabad 断層に沿って発生していることが確認された. Muzaffarabad 断層の変位が地表に到達したか, 少なくとも地表にごく近い地下まで変位し, 斜面崩壊や地すべりを惹起したと考えられる.

10 月 25 日に日立ソフトから公開されたバラコット地域のクイックバード画像では, より確実な断層変位地形が認定された.

図8は, 図7に示したバラコットの丘の建物の被害の状況である. 明らかに被害が周辺より著しいことがわかる. 前述のように, バラコットの丘の西側基部に逆断層性の地震断層を想定すると, 丘の上は地震断層の上盤側にあたる. 逆断層性の地震断層の上盤側の狭い範囲に建物の被害が集中することは, 1999 年の台湾・集集地震 (太田 1999) でも報告されている.

その南方のクンハール川では, 地震後の画像に, 地震前の画像には見られなかった河床の浅瀬が観察できる (図9). 位置的には上述のバラコットの丘基部に推定した地震断層の延長上にあたることから, 地震断層の変位により河床が隆起し, 部分的に離水したことが推定される. 後に, 栗田ほか (2006) によって, バラコットの丘と河床との間の地表に, 今回の地震による明瞭な東上がりの撓曲変形が確認された.

IV ムザファラバード北部の地表地震断層

土木学会は、10月24日から31日までパキスタン地震被害に対する予備調査団（団長：小長井一男東大教授）を派遣し、11月4日に調査結果の速報を公開した（土木学会 2005）。被害の状況やその分布、斜面崩壊などについて、豊富な写真とともに詳細に報告が行われており、現地状況をいち早く伝える貴重な情報であったが、断層変位については触れられていない。

この報告書の中の Figure 10（図 10）は、段丘の縁辺部で未固結の段丘礫層が支持力を失いすべった事例として紹介されている。しかしながら、中田 高氏は、この写真に写っている樹木が広範囲にわたって系統的に傾いていることから、撓曲に伴う地盤の傾動の可能性があることを指摘した（私信）。報告書では、この写真の撮影場所について、ムザファラバード北部とされているだけで、詳細な情報がなかったため、宇根と小荒井 衛（国土地理院）は、遠景に写っている斜面崩壊や周辺の建物を頼りに、前述のスペースイメージング社のホームページのイコノス画像上で特定した（図 11）。これをみると、南流するニーラム川の西岸の段丘を東西に切る崖の頂部に、建物の著しい被害

害が線上に集中していることがわかる。ムザファラバード周辺のイコノス画像については、国土地理院が、公開後すぐに全域にわたって地形学的判読を行い、その解釈をまとめている（佐藤ほか 2005a）が、この崖は、ニーラム川の側方浸食により形成された段丘崖と考え、変動地形としては認識しなかった。その理由のひとつは、中田・熊原（2005）の Tanda 断層、Muzaffarabad 断層は、一般に北北西－南南東の走向をもつことから、このような東西走向の変位地形の存在を想定していなかったことである。もうひとつの理由は、提供されている衛星画像が簡易なオルソ化を行った単画像であり、実体視ができないことから、地形面の变形や高度の不連続、変位の連続性、累積などの、変動地形の認定に必要な要素を判読することが困難であったことがあげられる。上述の土木学会報告書のような現地写真などの情報との併用や、スペースイメージング社や日立ソフトのホームページのように地震前後の画像の比較によりある程度補うことができるが、やはり実体視判読を行うことがもっとも効果的である。

このため、国土地理院では、地震後の 2 時期の SPOT5 衛星の実体視可能な画像を入手し、判読を行った。SPOT5 画像は、パンクロ解像度 2.5 m で、

図 10 土木学会予備調査団の報告書に載せられたムザファラバード北部の変位地形の写真（土木学会 2005）

Figure 10 A photo showing the landform deformation in northern Muzaffarabad published in the report by advanced team of JSCE reconnaissance team (JSCE: Japan Society of Civil Engineering) (JSCE 2005)

図 11 図 10 の地点のイコノス画像。左は地震前、右は地震後。図 3 の一部を拡大したもの（スペースイメージング社ホームページより）

Figure 11 IKONOS Satellite images of the area where Figure 10 was taken. Left; before earthquake; Right; after earthquake. Enlarged images of a part of Figure 3 (quoted from Space Imaging's home page)

イコノスやクイックバードに比べればやや劣るものの、比較的安価で広域のステレオペア画像が得られる。今回は、2005年10月20日と10月27日に撮影された画像を入手し、ステレオペアとした。

図12は、図10の地点を含むムザファラバード北部のSPOT5画像である。これを実体視すると、1) 楕円で示した崖が上位(左)と下位(右)の段丘面を切って連続し、変位の累積性がみられること、2) 崖が段丘崖と鋭角に斜交し、浸食崖としての連続性がないこと、3) 段丘面が北、すなわち上流に向かって逆傾斜していること、など、断層変位地形の特徴が明らかに認められる。さらに、この西方には、河谷の系統的な左ずれを伴うリニアメントが連続している。従って、この崖は、左ずれ成分を伴う北側隆起の活断層による低断層崖であり、図10に示したように断層上のみに著しい被害が見られることから、今回の地震で活動した地表地震断層であるとの結論を得た。このことはいち早く「写真測量とリモートセンシング」に報告した(佐藤ほか 2005b)。この地点についても、後に、栗田ほか(2006)によって、今回の地震に

よる明瞭な北上がりの地表地震断層が確認された。

中田・熊原(2005)のMuzaffarabad断層、Tanda断層は、北北西-南南東の一般走向で若干の右ずれ成分をもつ東側隆起の断層とされており、ほぼ東西の走向で若干の左ずれ成分をもつ北側隆起のムザファラバード北部の活断層のセンスはこれらと整合しない。その理由として、この断層が、それぞれほぼ30 kmの長さを持つMuzaffarabad, Tanda両断層が、この地域で乗り替わる形となっていることから、その間をつなぐ共役的な断層であると考えられる。また、合成開口レーダ(SAR)画像による地殻変動の解析や、それに基づく断層モデルからも、この地域が複雑な断層形状の影響で最大の変位量が現れていることが示されている(藤原ほか 2006)。

なお、Kumahara and Nakata (2006)は、現地における地表地震断層の調査結果等も踏まえて、活断層のトレースを再検討し、左ずれの部分も含んだ一連のBalakot-Garhi断層として記載している。

V まとめ

パキスタン北部地震は、被害の規模の大きさにもかかわらず、地震とその被害に関する現地からの情報がなかなか伝わらなかったが、高解像度衛星画像が迅速にインターネットに公開されたことで、世界中どこでも被災地に関する詳細な情報を共有することができた。

もうひとつ、今回の分析にあたって非常に効果的であったのは、メーリングリストを通じた研究者間の自由な議論である。

日本地理学会災害対応委員会では、2002年に、災害対応グループを組織した。この目的は、学会としての災害への多面的なアプローチの組織化を図るため、専用のメーリングリストを通じて日常的に災害対応に関する議論を行うほか、災害発生時には情報を交換し、必要ある時は緊急調査を組織したり、災害後における継続的調査に取り組むものである。グループには、専用のメールアドレスを持つ会員であれば誰でも参加できる。

今回の地震に関しては、例えば、バラコットの

図12 ムザファラバード北部の地震後のSPOT5画像。実体視可能。楕円は地表地震断層

Figure 12 Stereo pair of SPOT5 Satellite images of northern Muzaffarabad after the earthquake. Elliptic mark indicates surface rupture of earthquake fault

丘が異常な地形であること，グーグルアースや日立ソフトが高解像度衛星画像を公開していることなどの情報が，災害対応グループのメンバーから自発的にメーリングリストに流された．また，画像から判読された地形の解釈に当たっては，メーリングリストによるメンバーの自由な意見交換が行われた．

「リモートセンシング」という用語は，通常，地上の現地調査に対して，航空機や衛星などの上空から地表の探査を行う意味で用いられる．しかしながら，今回の分析は，被災地から遠く離れた場所で，インターネット上の情報を用い，インターネット上で議論しながら進められた．その意味で，「リモートセンシング」＝遠隔地からの探査であったといえる．

グーグルアースを契機に，インターネットを通じた衛星画像などの地理情報の提供は今後ますます進んでいくであろう．それに伴い，発展途上国や山間地など，現地からの情報が得にくい地域での災害の状況把握とその分析に，重要な情報源となっていくに違いない．

注

- 1) <http://www.spaceimaging.com/gallery/AsiaEQViewer.htm>
- 2) <http://www.hitachisoft.jp/News/News350.html>

(2006年9月25日受付 2007年1月11日受理)

文 献

栗田泰夫・金田平太郎・堤 浩之・中田 高・Hussain, A., Khahak, W., Ashraf, M., Awan, A., and Yeats, R. 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>

<著者略歴> 宇根 寛 (うね ひろし)

1958 年 東京都生まれ．国土地理院 地理地殻活動研究センター 研究管理課長．

宇根 寛・奥山祥司・根本寿男 2005. 平成 16 年 (2004 年) 新潟県中越地震に関する地理情報の緊急提供について．地図, 43(2), 1-10

太田陽子 1999. 台湾中部, 1999 年集集大地震による地震断層第 1 報．地質ニュース, 543, 7-14.

佐藤 浩・宇根 寛・小荒井 衛 2005a. 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．国土地理院「パキスタン北部地震関連ページ」
<http://cais.gsi.go.jp/Research/geoinfo/ikonos.pdf>

佐藤 浩・宇根 寛・小荒井 衛 2005b. カメラアイ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

中田 高・熊原康博 2005. パキスタン北部地震震源地域の活断層 (予察)．日本地理学会「災害対応のページ」

http://www.fal.co.jp/geog_disaster/20051018_pakistan.html.

藤原 智・飛田幹男・佐藤 浩・小沢新三郎・宇根 寛 2006. 衛星 SAR 解析による 2005 年パキスタン北部地震の地殻変動量と地震断層の推定．E-journal GEO, 本号.

八木勇治 2005. 2005/10/8 パキスタンで発生した地震の断層破壊のイメージング (暫定)．

http://www.geo.tsukuba.ac.jp/press_HP/yagi/EQ/2005Pakistan/

土木学会 2005. Provisional Report of the Damage Caused by Muzaffarabad Earthquake of October 8, 2005, Pakistan. http://www.jsce.or.jp/report/36/provisional_report02.pdf

Kumahara, Y., and Nakata, T. 2006. Active faults in the epicenter area of the 2005 Pakistan earthquake, Special Publication No.41, Research Center for Regional Geography (RCRG), Hiroshima University.

Nakata, T., Tsutsumi, H., Khan, S.H., and Lawrence, R.D. 1991. Active Faults of Pakistan Map Sheets and Inventories. Research Center for Regional Geography, Hiroshima University.

<著者略歴> 熊木洋太（くまき ようた）

1954 年 東京都生まれ．国土地理院 地理地殻活動研究センター長．