

平成17年10月21日
改訂 平成17年10月24日
三訂 平成17年11月 2日

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

IKONOS imagery interpretation on the disaster of northern Pakistan earthquake

国土地理院 地理地殻活動研究センター

佐藤 浩†・宇根 寛・小荒井 衛

Geographical Survey Institute H.P.SATO†, H.UNE, M.KOARAI

†E-mail : hsato@gsi.go.jp

1. はじめに

パキスタンで8日午前8時50分(現地時間)、首都イスラマバードの北北東約100 km、深さ26 kmを震源(北緯 34.493° 、東経 73.629°)とするマグニチュード7.6の地震が発生した(USGS, 2005)。イスラマバードの北北東、約85 km、震源に近い場所に位置するムザファラバード(Muzaffarabad)は、アザド・カシミール(Azad Kashmir)特別州の州都である。ムザファラバードは、都市部としては最大の被災地(毎日新聞, 2005)であり、同州では死者約1万8000人を超えたと報道されている(日本経済新聞, 2005)。また、パキスタン政府によると、国内の死者は4万9千人余り、負傷者は約7万4千人であるという(朝日新聞, 2005)。

米スペースイメージング社は、図1に示すように、ムザファラバードを中心とする約15 km×15 kmの範囲(図2)について、地震前(2002年9月22日)と地震後(2005年10月9日)の高解像度のIKONOS画像(Space Imaging, 2005)をWebで公開した。

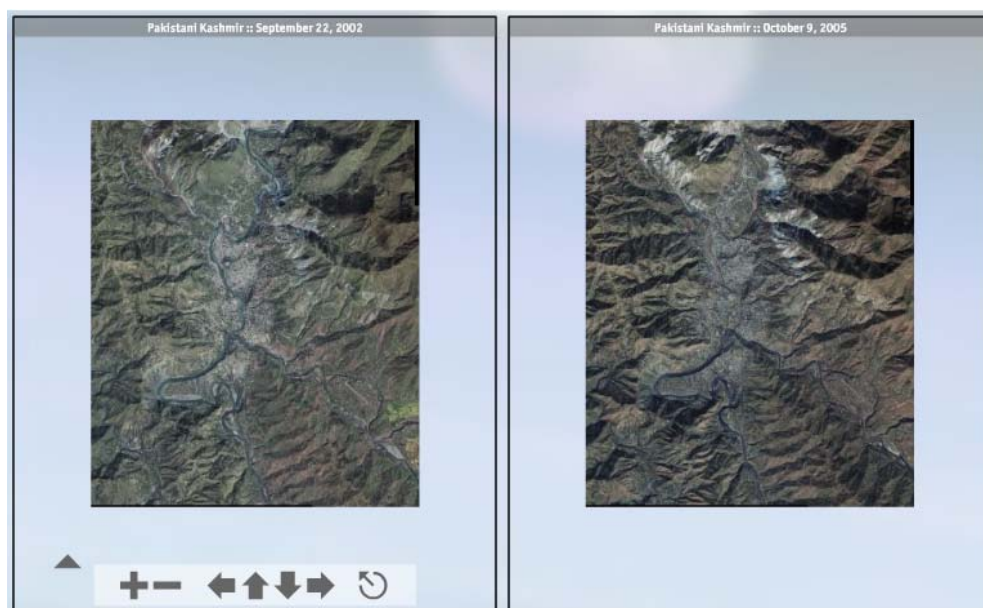


図1 Webで公開されているムザファラバード付近のイコノス画像(左が地震前、右が地震後)

Fig.1 IKONOS imagery in and around Muzaffarabad on the Web of Space Imaging (2005)

このサイトを参照すると、全体のみならず被災地の詳細な状態が把握可能なため、地震前に対して地震後の地形がどのように変化したのか、土砂災害を中心に災害状況を判読し、その状況をマッピングした。図3に、マッピングの結果を報告する。このような結果を得ることによって、日本のような山岳地帯における今後の地震防災対策の基礎資料が蓄積されることになる。

なお、マッピングの方法については、以下のとおりである。衛星画像を Web からダウンロードすることはできなかったので Web の画像を A2 判に拡大コピーし、その画像（解像度 100 m 程度）を背景に、画像の上で河川や空港の位置を描画するとともに、災害箇所を描画した。描画箇所の平面位置は、実際よりも 100 m 程度ずれている可能性がある。また、Web で公開されている画像は地震前後ともにステレオペアでは無いため立体視ができず、判読結果も土砂災害や地形的特徴を網羅していない。

図3に示したマッピングの結果は、地図に重なるように幾何補正してある。つまり、河道の屈曲点や合流点、約 10 点の座標値を地図から読み取り、それらを地上基準点として、マッピングの結果を幾何補正した。数値地形モデル(Digital Elevation Model: DEM)を用いた正射投影ではないので、とりわけ丘陵地、山地の傾斜地では、災害の描画箇所の平面位置は、実際よりも、更にずれている可能性がある。なお、文末ながら、被災された方々に、心よりお見舞いを申し上げます。

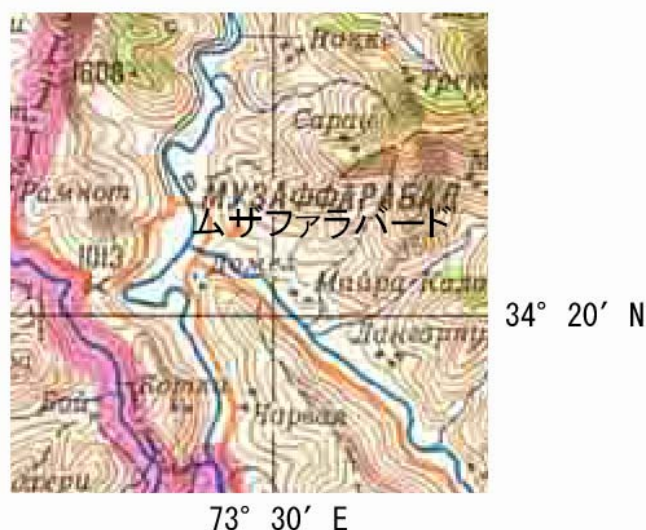


図2 図1の範囲(ソ連邦 50 万「I-43-A /スリナガル」より)

Fig.2 Area of Fig.1 (Part of Union of Soviet Socialist Republics 1:500,000 map I-43-A/Srinagar SW)

2. ムザファラバードの災害状況

2. 1 橋梁の状況

図3は、図1の左右の画像を比較して、地震後の災害状況を示したものである。図3において4ヶ所ある×印は道路の橋梁の橋桁が河床に落下あるいは橋梁そのものが判読できなかった箇所を示している。×印以外にも橋梁は多数認められるが、図1の判読からは、それが通行可能か不可能かは不明である。

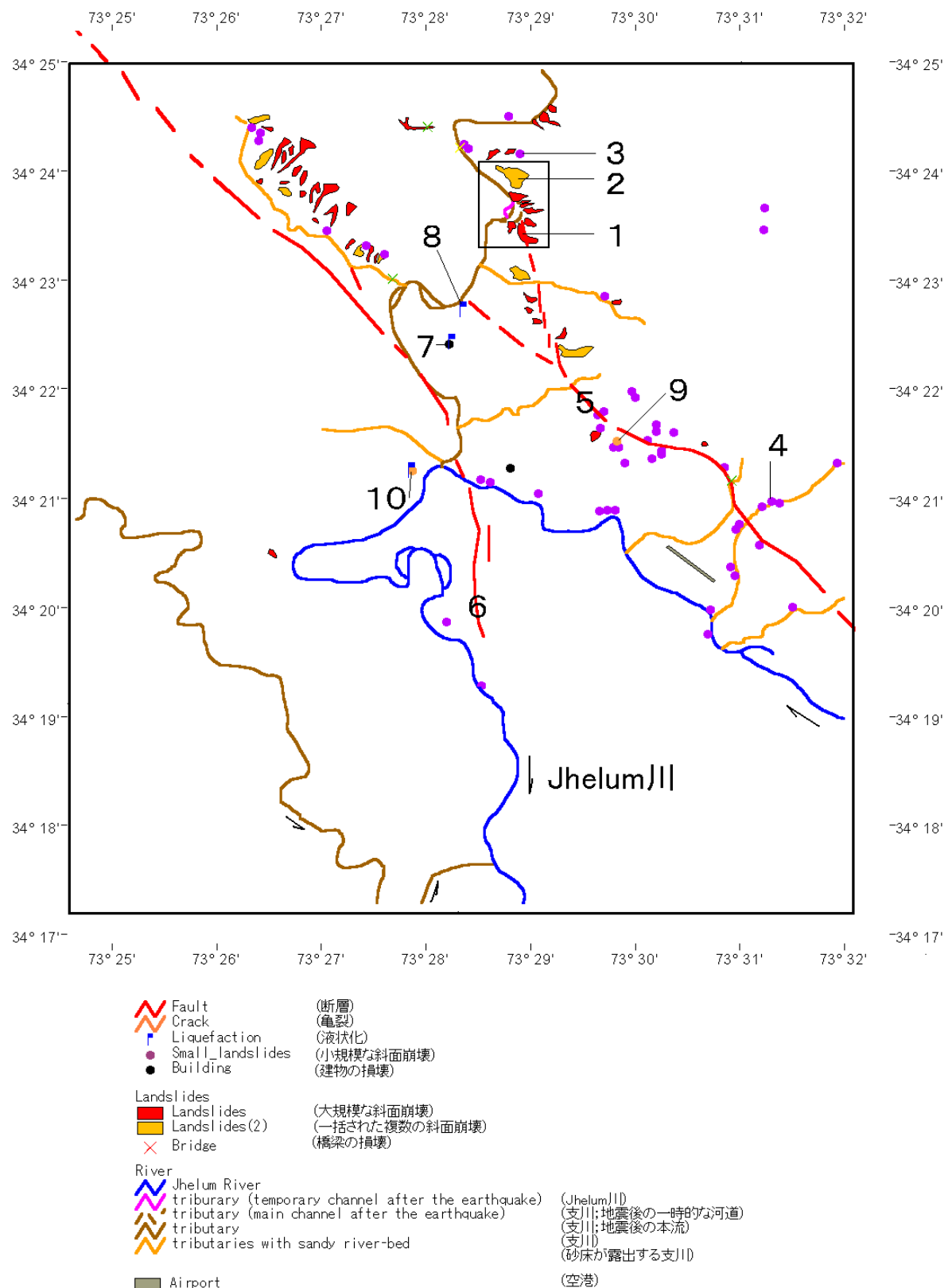


図3 図1に基づく災害状況と地形的特徴（黒枠は図7の範囲を示す；断層は中田・熊原, 2005。）

Fig.3 Mapping result of the disaster and geomorphological features interpreted on Fig.1

(Black frame indicates the area of Fig.7; fault is Nakata and Kumahara, 2005)

2. 2 河川の状況

図3の青色で示した河川はジェラム (Jhelum) 川の本川で、地震前後で河水の色に変わりはない(青色で、水流が白く渦巻く状態も判読可能である)。

図3の茶色で示した支川は、地震前後で常時水流の認められる河川であるが、地震前はジェラム川と同様、河水の色は青であった。地震後は、おそらく流域で生じた斜面崩壊の影響で供給された浮遊砂によるのであろう、茶色く混濁している。Web では未公開であるが、10月12日撮影イコノス画像を見たところ、ジェラム川本川も茶色く混濁していることが判った。ジェラム川上流部でも斜面崩壊が多発していることを伺わせる。

図3に橙色で示した支川は、砂床河川であるが、地震前後ともに水量に乏しい。河道の状況(分布や位置、幅)に大きな影響はなく、これらの河床高が上昇しているという証拠は判読できなかった。

2. 3 斜面崩壊の状況

図1左右の画像を判読して、今回の地震で生じたと思われる斜面崩壊をマッピングした。今回判読した範囲では、地震前にも斜面崩壊が多数認められるが、今回の地震で斜面に変化が無ければ、そのような斜面崩壊はマッピングしていない。

図3の「1」のように赤色の閉領域で示した斜面崩壊は、山腹の土砂が移動して斜面基部に扇状地状に堆積した地形を示している。判読によれば、土砂が水流の影響では無く乾燥状態で移動した、泥分が少なく砂分が卓越した堆積面を含む。図1の左右の画像を比較する限りでは、その発生域は斜面上に特定できない場合が多いが、発生域が認められる場合は、そこまで閉領域を延伸してある。「1」のタイプの斜面崩壊は、全部で40ヶ所認められた。斜面崩壊の実際の画像は、後出の図7を参照。

このような斜面崩壊は、表層崩壊や、おそらく、図1の左図を撮影してから今回の地震までの豪雨や雪氷の凍結・融解によって溪床に蓄積された不安定土砂が、今回の地震をきっかけに、表層崩壊を伴い斜面下方に移動してきたのであろう。扇状地状の堆積面の傾斜は、現地で計測しないと確定的なことは言えないが、以上の推察が正しければ、佐藤ほか(2005)を参照して 33° と推測される。今後、融雪期や豪雨期に水分をより多量に含み流動化しやすくなると、堆積土砂がジェラム川支川に流れ込み、本川や支川の河床を上昇させる可能性がある。

図3の「2」は、「1」の斜面崩壊が連なって個々に分け難い場合、包括的に範囲を囲んで示したものであり、全部で8ヶ所認められた。

図3の「3」は、「1」や「2」のタイプとは異なり、小規模で閉領域により囲み難い斜面崩壊である。全部で49ヶ所認められた。道路の損壊や流亡を伴っている場合が多い。

図3を見ると、前述の「1」～「3」の斜面崩壊は、後述するムザファラバード (Muzaffarabad) 断層やタンダ (Tanda) 断層に沿って多数分布することが判った。斜面崩壊は、ムザファラバード断層については北東側に、タンダ断層についてはこれに沿って多数、判読された。

斜面崩壊に伴う河道閉塞は、後で記載するジェラム川支川の1ヶ所と、図3で「4」に示す小規模な斜面崩壊に伴って生じた同支川1ヶ所の、合わせて2ヶ所で生じていることが判った。

2. 4 活断層

(1) タンダ断層

図3の「5」は、Nakata et al. (1991)によるタンダ断層である。その後、中田・熊原(2005)は1971年に撮影されたコロナ衛星写真を再判読して断層線を引き直しているため、ここでは中田・熊原

(2005)に基づいた断層線を示す。図 1 の左右の画像を比較する限りでは、本断層を中心とする地形の変位は判読できなかった。

Nakata et al (1991)は、1/40,000 空中写真を判読してパキスタンの活断層を 1/250,000 地形図にマッピングし、その結果を 1/500,000 の地図にして公表している。これによれば、活断層は、明瞭さや活断層によって切られる地形面の地質年代に基づいて、

Class I (definitely active)

Class II (probably active)

Class III (possibly active、但し明瞭な活断層のみマッピング)

の 3 分類と

Activity A (1 m/1000 年)

Activity B (0.1-1 m/1000 年)

Activity C (0.1 m 未満 /1000 年)

の 3 分類の

3 × 3 = 9 通りで分類されている。その他、この研究に基づきタンダ断層の諸元を記すと、

Class I ~ II

Activity B

走向：北西-南東

長さ：16 km

隆起：北東側が相対的に隆起

切られる地形面：更新世の扇状地

特徴的な地形：断層崖

となっている。中田・熊原 (2005)によれば、タンダ断層を横切る支川は、上流から下流に向かって右屈曲している場所が散見され、これまでの断層変位は右横ずれ逆断層的であったとしているが、タンダ断層と今回の地震との関連は明らかではないとしている。

(2) ムザファラバード断層

図 3 の「6」はムザファラバード断層であるが、その位置は中田・熊原 (2005)に基づいている。タンダ断層同様、地形の変位は判読できなかった。本断層の諸元を、Nakata et al. (1991)に基づき記すと、

Class I ~ II

Activity 不明

走向：南北

長さ：8 km

隆起：西側が相対的に隆起

切られる地形面：更新世の段丘（起源不明）

特徴的な地形：河川に対して逆傾斜の崖、リニアメント、（地形面あるいは層理面の）撓み

となっている。

中田・熊原 (2005)によれば、ムザファラバード断層に沿って東向きの断層崖が見られる。また、支川の屈曲から右横ずれのタンダ断層を横切る支川は、上流から下流に向かって右屈曲している場所が散見されることから、これまでの断層変位は右横ずれ逆断層的であったとしている。なお、タンダ断層同様、今回の地震との関連は明らかでは無い。

2. 4 人工構造物の損壊

(1) 建物

Web で図 1 の左右の画像を閲覧し、ムザファラバード市街地の倒壊建物を網羅的にマッピングするとともに倒壊の度合を判読するのは困難である。ここでは、建物倒壊の代表例として、図 4 に基づき、グラウンド周囲の建物倒壊について述べる。

図 4 において、左の画像が地震前、右の画像が地震後の画像である。図 4 において、「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、損壊しているようである。「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、外縁が歪んでおり損壊（一部倒壊）している可能性がある。

図 4 において、「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、半壊しているようである。「4」のグラウンドには、被災者の人影か、避難用テントか不明であるが、人が集まっているようである。「5」は、地震前と比較して地面が茶色くなっており、土壌が水分を含んでいるようである。それが降雨によるものなのか、あるいは地盤の液状化に伴うものなのかは、現地を見ないと判断できない。



図 4 図 3 の「7」に示した地点周辺の建物倒壊

Fig.4 Damaged buildings on the site “7” in Fig.3

(2) 地盤の液状化

図 5 の右の画像（地震後）において、グラウンドの南西部の地表面は左の画像（地震前）と比較し、茶色に変色し、波だっているような模様が判読できる。液状化を示唆している。地震前の画像を見ると、当該箇所は、グラウンドの他箇所と比較して、水分で湿っていることから、もともと土壌水分が多いような盛土部であった可能性もある。しかし、その周囲の建物を見ると、ことさらその周辺部の建物が全壊しているというわけでは無く、当該箇所で何が生じたのか、現地を見ないと判断できない。

(3) 滑走路

図 3 に示す空港の滑走路上には、路面の損壊や亀裂等の異常は認められない。

2. 5 亀裂の状況

グラウンドのような裸地において、顕著に認められる亀裂が 2 ヶ所（図 3 の「9」と「10」）判読された。「9」の亀裂の方向は東北東—西南西、「10」は北東—南西であった。図 7 に、図 3 の「9」地点の拡大画像を示す。



図 5 図 3 の「8」に示した地盤の液状化が疑われる地点
Fig.5 The site “8” in Fig.3 where liquefaction may occur.



図 6 図 3 の「9」に示した地点の亀裂
Fig.6 Cracks on the site “9” in Fig.3

今回の地震による断層の変位との関連性は不明であるが、仮に、「9」がタンダ断層による、「10」がムザファラバード断層による、それぞれ右横ずれ変位によって地盤が引きずられて形成された可能性がある。しかし、これらの箇所が盛土部ならば、単に盛土の形状に沿って斜面の谷側に土砂が移動しただけなのかもしれない。現地や施工時の資料を見ないと不明である。

3. ジェラム川支川の河道閉塞

図7は、図3のうちムザファラバード北方、ジェラム川支川の河道閉塞を示したものである。図7において、「1」、「2」は図3と同様、斜面崩壊である。

図1左の画像を参照すると、支川は、当初、図7の「3」の茶色の点線の部分を通して南流していたが、おそらく本地震で多発した斜面崩壊とそれに伴う堆積面が支川の河道を塞いだ結果、一時的に堪水して図7の「4」のやや上流で決壊し、右岸を浸食しながらピンク色で示した箇所新たに河道を形成した。その後、「5」にも開削された（おそらく自然流下によるのであろう）河道を通じた河水の流量が、ピンクの河道の流量を超えて下刻が顕著となったため、「4」の河道が寄り洲の上に放棄されて、地震後の「5」の河道が固定されたと考えられる。

したがって、堪水していた期間は地震後1日程度と短期間だったと推測される。

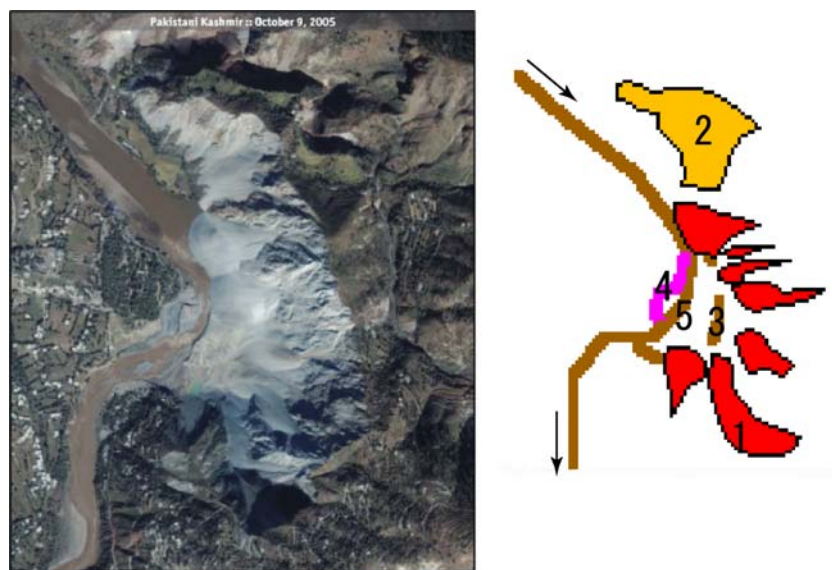


図7 地震に伴うと思われる河道閉塞の地形変化

Fig. 7 Landform change of the landslide dam which may be triggered by the earthquake

4. 河成段丘と断層の関係

4. 1 河成段丘

ムザファラバードの市街地は、ジェラム川及びその支川の河成段丘上に発達しており、何段かに分類できる。今回、立体視していないため、つづら折りに段丘崖を登る道路や橋梁の高低の関係から、ムザファラバード付近の河成段丘を低位、中位、高位（図8のそれぞれ「1」、「2」、「3」）に分類し、これらの河成段丘とタンダ断層、ムザファラバード断層による断層変位の関係、そして本地震による河成段丘面の変位（傾動や上下方向の変位）を判読した。しかし、今回の地震による著しい変化は認められなかった。

4. 2 地形の盛り上がり

図8の「4」のなまこ状の地形の盛り上がりは、Nakata et al. (1991)では明示的にしめされていないが、そのマッピング結果から推察すると、ムザファラバード断層の西側に位置する丘状の地形であ

る。中田・熊原 (2005)によれば、ムザファラバード断層は、ムザファラバード南方で河成段丘を変位させているとしており、この丘も、同様に断層変位を受けて形成されたと思われる。ただし、隆起による地形なのか、それとも尾根の一部が横ずれで変位した地形（閉塞丘）なのかは不明である。

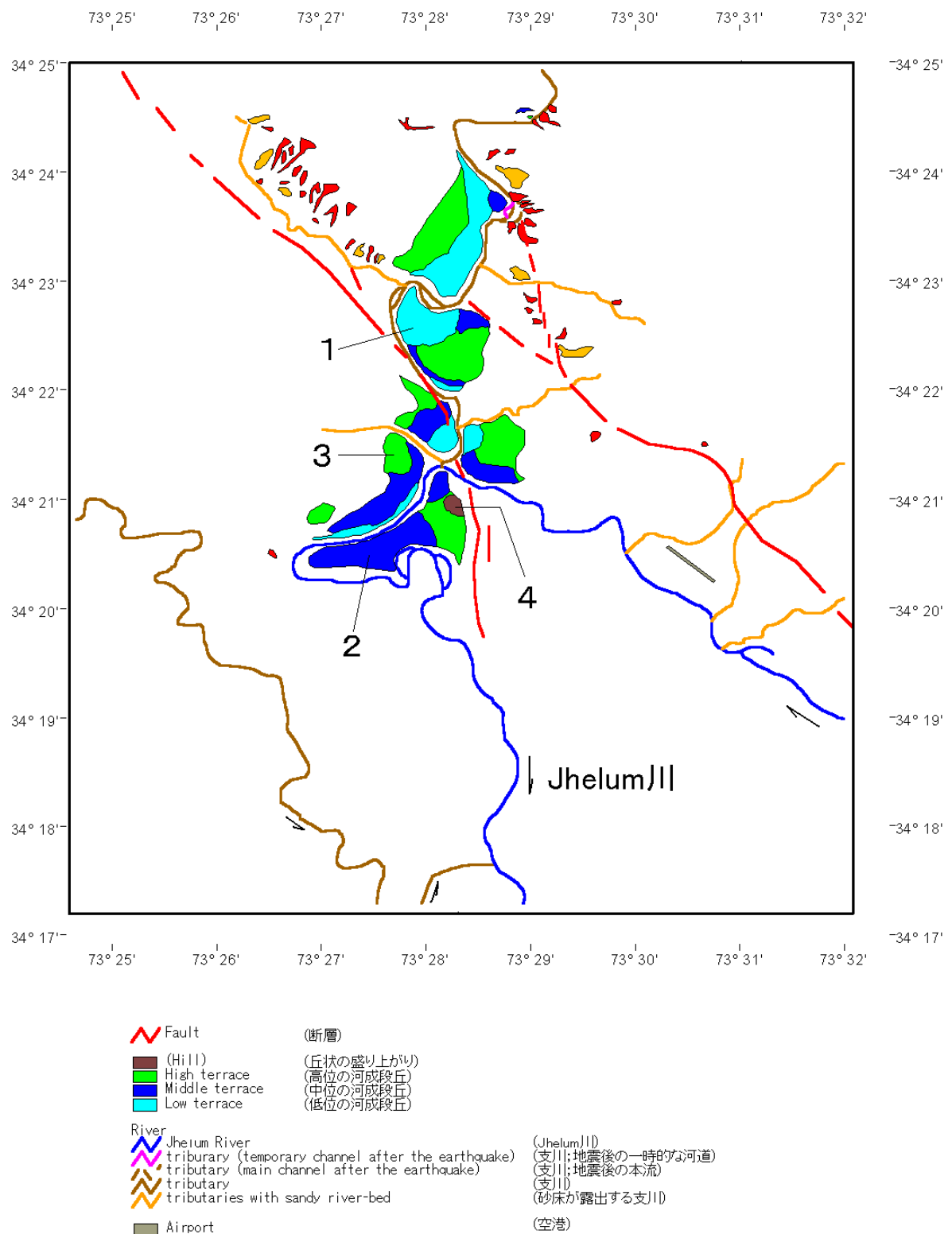


図 8 図 1 から判読された河成段丘と中田・熊原(2005)による断層との位置

Fig.8 River terrace interpreted on Fig.1 (this study) and fault (Nakata and Kumahara, 2005)

5. まとめ

米スペースイメージング社が Web で公開している 2005 年 10 月 8 日のパキスタン北部地震前後の IKONOS 画像を用いて、災害状況と地形的特徴を判読した。判読した限りでは 97 ヶ所の斜面崩壊（うち、大規模な斜面崩壊；40 ヶ所、斜面崩壊が連続している箇所；8 ヶ所、小規模な斜面崩壊；49 ヶ所）が生じた。大規模な斜面崩壊については、斜面上で発生域が特定できるものは多くなく、表層崩壊や、表層崩壊に伴い、地震前の豪雨や凍結・融解作用で斜面に堆積していた不安定な土砂が、今回の地震をきっかけに、乾燥状態で斜面下方に移動したと考えることができる。

建物倒壊については、地震前後の単画像の比較だけでは、その度合を網羅的にマッピングすることは困難だった。

現在のところ、今回の地震とタンダ断層、ムザファラバード断層の断層変位の関係は明らかにされていないが、斜面崩壊の多くは、これら 2 つの断層の北東側に集中していた。また、地震によると思われる斜面崩壊で 2 ヶ所の河道閉塞が判読された。

タンダ断層、ムザファラバード断層に伴う地形の変位は、判読した範囲では認められず、特に、河成段丘についても傾動や上下方向の変位は判読できなかった。

引用文献

朝日新聞, 2005, <http://www.asahi.com/special/051008/TKY200510200320.html>

(accessed 1 November 2005).

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 (accessed 20 October 2005).

毎日新聞, 2005, 10 月 12 日朝刊.

日本経済新聞, 2005, 10 月 14 日朝刊.

佐藤 浩・中島達也・福住真仁・上妻由拓, 2005, 火山活動終了後の雲仙普賢岳・水無川流域の一次元河床高変動モデル計算. 地形, 26, 259-280.

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.

Space Imaging, 2005, <http://www.spaceimaging.com/gallery/AsiaEQViewer.htm> (accessed 16 October 2005).

United States Geological Survey (USGS), 2005, Earthquake hazard program, <http://earthquake.usgs.gov/eqinthenews/2005/usdyae/> (accessed 16 October 2005).